



TUGAS AKHIR–TL184834

**OPTIMASI PARAMETER PERLAKUAN PANAS TERHADAP
KEKERASAN BAJA AISI 4140 DENGAN METODE TAGUCHI
UNTUK APLIKASI POROS POMPA SENTRIFUGAL
MULTISTAGE**

**ARIA NARENDRA ADHI
NRP. 02511640000002**

**Dosen Pembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



TUGAS AKHIR–TL 184834

**OPTIMASI PARAMETER PERLAKUAN PANAS
TERHADAP KEKERASAN BAJA AISI 4140 DENGAN
METODE TAGUCHI UNTUK APLIKASI POROS POMPA
SENTRIFUGAL MULTISTAGE**

ARIA NARENDRA ADHI
NRP. 02511640000002

Dosen Pembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT–TL 184834

**OPTIMIZATION OF HEAT TREATMENT PARAMETER
ON THE HARDNESS OF AISI 4140 STEEL USING
TAGUCHI METHOD FOR CENTRIFUGAL
MULTISTAGE PUMP SHAFT APPLICATION**

ARIA NARENDRA ADHI
NRP. 02511640000002

Advisor
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

MATERIAL AND METALLURGICAL ENGINEERING
DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020

(This page is intentionally left blank)

**OPTIMASI PARAMETER PERLAKUAN PANAS
TERHADAP KEKERASAN BAJA AISI 4140 DENGAN
METODE TAGUCHI UNTUK APLIKASI POROS POMPA
SENTRIFUGAL MULTISTAGE**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material & Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ARIA NARENDRA ADHI
NRP 02511640000002

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. (Pembimbing I)
2. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. (Pembimbing II)



SURABAYA
Agustus 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

OPTIMASI PARAMETER PERLAKUAN PANAS TERHADAP KEKERASAN BAJA AISI 4140 DENGAN METODE TAGUCHI UNTUK APLIKASI POROS POMPA SENTRIFUGAL MULTISTAGE

Nama : Aria Narendra Adhi
NRP : 02511640000002
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing 1 : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Dosen Pembimbing 2 : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

Abstrak

Poros merupakan salah satu komponen terpenting dari pompa sentrifugal multistage. Baja AISI 4140 adalah salah satu material yang dapat digunakan untuk aplikasi poros pompa sentrifugal multistage. Namun kekerasannya hanya sekitar 293 HV, sementara menurut katalog ASSAB 709 yang ekuivalen dengan 4140, kekerasan yang dipersyaratkan adalah sebesar 302-372 HV. Perlakuan panas diperlukan untuk mendapatkan sifat mekanik yang sesuai dengan standar, dengan variasi berupa temperatur austenisasi, media quenching, dan temperatur tempering. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kombinasi parameter yang dapat menghasilkan kekerasan optimum serta persentase kontribusi setiap parameter terhadap hasil akhir menggunakan metode Taguchi. Metode pengujian yang digunakan adalah uji hardness Vickers dan uji metalografi. Melalui analisis S/N ratio, didapatkan kombinasi parameter optimum yaitu temperatur austenisasi 877°C, media quenching brine, dan temperatur tempering 545°C. Melalui analisis ANOVA, didapatkan bahwa parameter temperatur austenisasi memiliki persentase kontribusi sebesar 0,46%; media quenching sebesar 5,84%; dan temperatur tempering sebesar 92,67%.

Kata Kunci : AISI 4140, Kekerasan, Perlakuan panas, Pompa, Taguchi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

OPTIMIZATION OF HEAT TREATMENT PARAMETER ON THE HARDNESS OF AISI 4140 STEEL USING TAGUCHI METHOD FOR CENTRIFUGAL MULTISTAGE PUMP SHAFT APPLICATION

Student Name : Aria Narendra Adhi
NRP : 02511640000002
Department : Material and Metallurgical Engineering
Advisor 1 : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Advisor 2 : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

Abstract

Shaft is one of the most important components of a multistage centrifugal pump. Material that can be used for multistage centrifugal pump shaft applications is AISI 4140 steel. However, the hardness is only around 293 HV, while according to ASSAB 709 catalog which is equivalent to 4140, required hardness is 302-372 HV. Heat treatment is carried out with variations in austenization temperature, quenching media, and tempering temperature to obtain mechanical properties in accordance with the standard. This research was conducted to analyze the combination of parameters that can produce optimum hardness and the percentage contribution of each parameter to the final result using the Taguchi method. The test method used is Vickers hardness test and metallographic test. Through the analysis of S / N ratio, the optimum parameter combination is obtained, namely 877°C austenization temperature , brine quenching media, and 545°C tempering temperature. Through ANOVA analysis, it was found that the austenization temperature had a contribution percentage of 0,46%; media quenching of 5,84%; and tempering temperature of 92,67%.

Keywords : AISI 4140, Hardness, Heat treatment, Pump, Taguchi

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah ‘azza wa jalla, karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Pengerjaan Tugas Akhir ini dimaksudkan untuk memenuhi mata kuliah wajib yang harus diambil oleh mahasiswa Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS. Penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Optimasi Parameter Perlakuan Panas Terhadap Kekerasan Baja AISI 4140 Dengan Metode Taguchi Untuk Aplikasi Poros Pompa Sentrifugal Multistage”**.

Selesainya Laporan Tugas Akhir ini tidak luput dari bantuan dan motivasi dari semua pihak. Untuk itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. dan Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas bimbingannya selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
2. Kedua orang tua penulis yang selalu memberikan dukungan selama proses perkuliahan di ITS.

Penulis menyadari penyusunan laporan ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif dari pembaca. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembacanya.

Surabaya, Agustus 2020
Penulis

Aria Narendra Adhi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

| | |
|-----------------------------------------------|-------------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| LEMBAR PENGESAHAN..... | v |
| Abstrak..... | vii |
| Abstract..... | ix |
| KATA PENGANTAR..... | xi |
| DAFTAR ISI..... | xiii |
| DAFTAR GAMBAR..... | xvii |
| DAFTAR TABEL..... | xix |
| 1 BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah..... | 2 |
| 1.3 Batasan Masalah..... | 2 |
| 1.4 Tujuan Penelitian..... | 3 |
| 1.5 Manfaat Penelitian..... | 3 |
| 2 BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 5 |
| 2.1 Pompa Sentrifugal <i>Multistage</i> | 5 |
| 2.2 Baja..... | 6 |
| 2.2.1 Baja AISI 4140..... | 6 |
| 2.3 Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C..... | 7 |
| 2.4 Perlakuan Panas..... | 9 |
| 2.4.1 <i>Hardening</i> | 9 |
| 2.4.2 <i>Austenizing</i> | 9 |
| 2.4.3 <i>Quenching</i> | 10 |
| 2.4.4 <i>Tempering</i> | 11 |
| 2.5 Metode <i>Taguchi</i> | 12 |
| 2.5.1 Perancangan Eksperimen..... | 13 |
| 2.5.2 <i>S/N Ratio</i> | 14 |
| 2.5.3 <i>ANOVA</i> | 15 |
| 2.6 Metode Pengujian..... | 16 |
| 2.6.1 Pengujian Kekerasan Vickers..... | 16 |
| 2.6.2 Pengujian Metalografi..... | 16 |
| 2.6.3 Pengujian OES..... | 17 |
| 2.7 Penelitian Sebelumnya..... | 18 |

| | | |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.7.1 | Optimasi Parameter Perlakuan Panas Terhadap Kekerasan Baja AISI 4140 Untuk Aplikasi <i>Bucket Teeth Excavator</i> | 18 |
| 2.7.2 | Optimasi Parameter Perlakuan Panas Terhadap Kekerasan Baja En-31 <i>High Manganese Steel</i> | 18 |
| 2.7.3 | Optimasi Parameter Perlakuan Panas Terhadap Kekerasan Baja Karbon Menengah | 19 |
| 3 BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... | | 21 |
| 3.1 | Diagram Alir | 21 |
| 3.2 | Bahan Penelitian | 22 |
| 3.3 | Alat Penelitian..... | 23 |
| 3.4 | Metode Penelitian | 26 |
| 3.4.1 | Preparasi Material..... | 26 |
| 3.4.2 | Penentuan Parameter dan Variasi..... | 27 |
| 3.4.3 | Perancangan <i>Orthogonal Array</i> | 27 |
| 3.4.4 | Analisis <i>S/N Ratio</i> dan <i>ANOVA</i> | 28 |
| 3.4.5 | Pengujian Konfirmasi..... | 29 |
| 3.5 | Pengujian..... | 29 |
| 3.5.1 | Pengujian Komposisi..... | 30 |
| 3.5.2 | Pengujian Metalografi | 30 |
| 3.5.3 | Pengujian Kekerasan | 30 |
| 3.6 | Rancangan Penelitian..... | 31 |
| 3.7 | Jadwal Penelitian | 32 |
| 4 BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | | 35 |
| 4.1 | Hasil Pengujian Sampel Tanpa Perlakuan | 35 |
| 4.1.1 | Hasil Pengujian Komposisi | 35 |
| 4.1.2 | Hasil Pengujian Kekerasan dan Metalografi | 36 |
| 4.2 | Hasil Pengujian Sampel <i>Orthogonal Array L9</i> | 37 |
| 4.2.1 | Hasil Pengujian Kekerasan..... | 37 |
| 4.2.2 | Hasil Pengujian Metalografi..... | 39 |
| 4.3 | Analisis <i>S/N Ratio</i> dan <i>ANOVA</i> | 41 |
| 4.3.1 | Analisis <i>S/N Ratio</i> | 41 |
| 4.3.2 | Analisis ANOVA | 44 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------|-----------|
| 4.4 | Hasil Pengujian Konfirmasi..... | 45 |
| 5 | BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 47 |
| 5.1 | Kesimpulan | 47 |
| 5.2 | Saran | 47 |
| | DAFTAR PUSTAKA | 49 |
| | LAMPIRAN | 53 |
| | UCAPAN TERIMA KASIH..... | 65 |
| | BIODATA PENULIS | 67 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.1 | Pompa sentrifugal <i>multistage</i> | 5 |
| Gambar 2.2 | Diagram fasa Fe-Fe ₃ C | 8 |
| Gambar 2.3 | Tiga tahapan <i>quenching</i> | 10 |
| Gambar 2.4 | Bentuk indenter dan hasil indentasi <i>Vickers</i> | 16 |
| Gambar 3.1 | Diagram alir..... | 22 |
| Gambar 3.2 | Mesin pemotong | 23 |
| Gambar 3.3 | Mesin <i>Grinding-Polish</i> | 24 |
| Gambar 3.4 | Mesin OES..... | 24 |
| Gambar 3.5 | Mesin HBRV <i>Universal Hardness Tester</i> 187.5A | 25 |
| Gambar 3.6 | Mikroskop optik Olympus BX51M..... | 25 |
| Gambar 3.7 | <i>Furnace</i> elektrik | 26 |
| Gambar 3.8 | Diagram alir pengujian konfirmasi..... | 29 |
| Gambar 3.9 | Skema pengujian kekerasan..... | 31 |
| Gambar 4.1 | Struktur mikro sampel tanpa perlakuan (perbesaran 500x, etsa nital)..... | 36 |
| Gambar 4.2 | Struktur mikro sampel nomor 3 (perbesaran 1000x, etsa nital) | 39 |
| Gambar 4.3 | Struktur mikro sampel nomor 4 (perbesaran 1000x, etsa nital) | 40 |
| Gambar 4.4 | Struktur mikro sampel optimum (perbesaran 1000x, etsa nital) | 45 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------------|---------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2.1 | Komposisi standar baja AISI 4140 | 7 |
| Tabel 3.1 | Parameter yang digunakan dan variasinya | 27 |
| Tabel 3.2 | <i>Orthogonal array L9</i> | 28 |
| Tabel 3.3 | Rancangan penelitian..... | 31 |
| Tabel 3.4 | Jadwal penelitian | 32 |
| Tabel 4.1 | Hasil uji komposisi | 35 |
| Tabel 4.2 | Hasil uji kekerasan sampel tanpa perlakuan..... | 36 |
| Tabel 4.3 | Hasil uji kekerasan sampel <i>orthogonal array L9</i> | 38 |
| Tabel 4.4 | Nilai <i>S/N ratio</i> dari setiap sampel..... | 41 |
| Tabel 4.5 | Respon <i>S/N ratio</i> untuk level dari tiap parameter | 42 |
| Tabel 4.6 | Respon kekerasan untuk level dari tiap parameter | 43 |
| Tabel 4.7 | Prediksi kekerasan dan <i>S/N ratio</i> optimum | 43 |
| Tabel 4.8 | <i>ANOVA</i> untuk kekerasan optimum baja AISI 4140 | 44 |
| Tabel 4.9 | Kekerasan dan <i>S/N ratio</i> sampel optimum | 45 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pompa merupakan sebuah alat yang berfungsi untuk memindahkan fluida dari suatu tempat menuju tempat lain dengan cara memberikan energi kepada fluida. Energi mekanik yang diberikan pompa dimanfaatkan untuk meningkatkan kecepatan, tekanan, ataupun ketinggian (Harahap dan Fakhruddin, 2018). Pompa banyak ditemukan dalam kehidupan sehari-hari dan memiliki pengaplikasian yang luas, mulai rumah tangga hingga sektor industri. Salah satu jenis pompa adalah pompa sentrifugal *multistage*. Pompa jenis ini banyak ditemukan di industri, beberapa contoh penggunaannya adalah pompa pengisi *Heat Recovery System Generator* (HRSG) pada PLTGU (Sumarno dan Suwarti, 2015) dan pompa penyalur air panas hasil sisa uap penggerak turbin pada pabrik gula (Andika, 2019). Salah satu bagian terpenting dari pompa sentrifugal adalah poros. Komponen ini berfungsi untuk meneruskan gaya dari penggerak saat pompa beroperasi (Hariady, 2014) dan sebagai tempat melekatnya *impeller*. Bila komponen ini mengalami kegagalan maka akan menyebabkan pompa berhenti bekerja. Diantara penyebab kegagalan pada poros adalah sifat mekanik yang tidak sesuai dengan standar (Azizi, 2019).

Baja AISI 4140 adalah salah satu material yang dapat digunakan untuk aplikasi poros. Menurut katalog ASSAB 709 yang ekuivalen dengan 4140, kekerasan yang disyaratkan untuk penggunaan sebagai poros adalah sebesar 302-372 HV. Sementara itu, kekerasan baja AISI 4140 hanya sekitar 293 HV. Optimalisasi sifat mekanik menggunakan perlakuan panas diperlukan agar didapatkan sifat mekanik yang sesuai dengan standar sehingga meminimalisir resiko terjadinya kegagalan. Namun, untuk mendapatkan sifat mekanik yang optimum diperlukan riset yang menghabiskan waktu dan biaya yang tidak sedikit, serta jumlah eksperimen yang cukup banyak. Agar riset yang dilakukan lebih

efisien, salah satu metode yang bisa digunakan adalah metode *Taguchi*. Metode ini mempunyai keunggulan untuk merancang penelitian secara efisien dengan jumlah eksperimen seminimal mungkin dan memberikan informasi sebanyak mungkin tentang parameter-parameter yang digunakan

Pada penelitian ini dilakukan proses perancangan eksperimen menggunakan metode *Taguchi*, yang dilanjutkan dengan perlakuan panas terhadap baja AISI 4140 dengan cara *hardening* dan *tempering* dengan parameter-parameter tertentu. Kemudian dilakukan analisis terhadap data kekerasan guna menghasilkan kombinasi parameter optimum dan persentase kontribusi parameter terhadap kekerasan.. Melalui penerapan hasil analisis tersebut dapat didapatkan kekerasan optimum dari baja AISI 4140 untuk aplikasi poros pompa sentrifugal *multistage*.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara menganalisis data kekerasan hasil eksperimen guna menghasilkan kombinasi parameter optimum yang sesuai untuk aplikasi poros pompa sentrifugal *multistage*?
2. Bagaimana menganalisis persentase kontribusi dari setiap parameter perlakuan panas terhadap kekerasan baja AISI 4140?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Temperatur media *quenching* yang digunakan dianggap sama dengan temperatur ruang.
2. Diasumsikan tidak ada penurunan temperatur saat spesimen dikeluarkan dari *furnace*.
3. Lama waktu pemindahan spesimen dari *furnace* menuju media *quenching* dianggap konstan untuk semua spesimen.
4. Repetisi eksperimen sebanyak dua kali ($N=3$).
5. Temperatur material di dalam *furnace* dianggap sama dengan temperatur yang tertera pada indikator.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis data kekerasan hasil eksperimen guna menghasilkan kombinasi parameter optimum yang sesuai untuk aplikasi poros pompa sentrifugal *multistage*.
2. Menganalisis persentase kontribusi dari setiap parameter perlakuan panas terhadap kekerasan baja AISI 4140.

1.5 Manfaat Penelitian

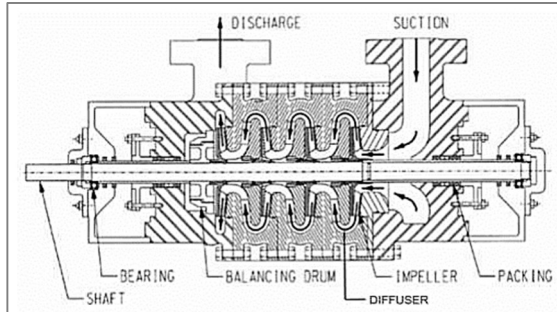
Manfaat penelitian ini adalah memberikan rekomendasi perlakuan panas yang tepat untuk mendapatkan kekerasan optimum dari baja AISI 4140 jika digunakan untuk aplikasi poros pompa sentrifugal *multistage*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pompa Sentrifugal *Multistage*



Gambar 2.1 Pompa sentrifugal *multistage* (Sumarno dan Suwarti, 2015).

Pompa adalah alat fluida hidrolik untuk memindahkan fluida non-kompresibel dari suatu tempat ke tempat yang lain dengan cara meningkatkan tekanan fluida tersebut (Hariady, 2014). Prinsipnya, pompa mengkonversi energi mekanik dari penggerak menjadi energi aliran pada fluida yang melewatinya. Dengan demikian pompa meningkatkan energi dari fluida tersebut yang digunakan untuk mengalirkannya menuju tempat yang lebih tinggi, mengatasi resistansi hidrolik dari isap dan tekan, serta mempercepat alirannya. Salah satu contoh pompa adalah pompa sentrifugal *multistage*, sebagaimana pada Gambar 2.1. Pompa ini menggunakan beberapa *impeller* yang tersusun secara seri dalam satu poros. Fluida yang keluar dari *impeller* pertama akan masuk ke *impeller* berikutnya dan seterusnya hingga *impeller* terakhir. *Head* total pompa merupakan penjumlahan dari *head* masing-masing *impeller* sehingga relatif tinggi. Pompa ini mampu untuk meningkatkan tekanan tinggi dan memiliki kapasitas sedang (Sumarno dan Suwarti, 2015).

2.2 Baja

Baja merupakan paduan dari besi-karbon serta beberapa unsur paduan lain yang memiliki komposisi dan perlakuan panas yang berbeda-beda. Secara umum baja diklasifikasikan berdasarkan kadar karbonnya, yaitu baja karbon rendah, baja karbon menengah, dan baja karbon tinggi. Baja juga diklasifikasikan berdasarkan kandungan unsur paduan. Baja karbon biasa (*plain carbon steel*) hanya mengandung *impurities* (pengotor) selain karbon dan sedikit mangan. Sementara baja paduan, memiliki banyak kandungan unsur paduan yang sengaja ditambahkan ke dalamnya (Callister dan Rethwisch, 2014).

2.2.1 Baja AISI 4140

Menurut *American Iron and Steel Institute* (AISI), tipe 4140 adalah baja paduan rendah yang didesain menggunakan *four-digit number*. Hal ini menunjukkan perbedaan kandungan komposisi dalam baja tersebut. Angka 4 menunjukkan unsur paduan *chromium* dan *molybdenum*, angka 1 menunjukkan persentase paduan $\pm 1\%$, dan angka 40 menunjukkan persentase kandungan karbon sebesar $\pm 0,4\%$ (Fendri dkk., 2018). Baja ini relatif murah, memiliki *hardenability*, *ductility*, dan *weldability* yang cukup baik (Suherman, 1999). Komposisi standar baja AISI 4140 ditunjukkan pada Tabel 2.1 di bawah ini.

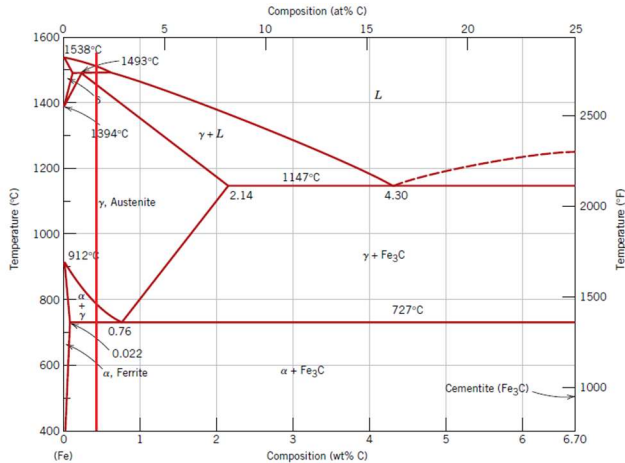
Tabel 2.1 Komposisi standar baja AISI 4140 (ASTM, 2000, ASSAB, 2018)

| Unsur | Kandungan (%) | |
|-------|---------------|-----------|
| | ASTM A29 | ASSAB 709 |
| C | 0,38-0,43 | 0,4 |
| Mn | 0,75-1,00 | 0,8 |
| P Max | 0,035 | - |
| S Max | 0,04 | - |
| Si | 0,15-0,35 | 0,2 |
| Ni | - | - |
| Cr | 0,8-1,10 | 1,0 |
| Mo | 0,15-0,25 | 0,2 |

2.3 Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Dalam kondisi cair (*liquid*), karbon akan larut tak terbatas dalam besi. Namun, dalam kondisi padat (*solid*), kelarutan karbon dalam besi akan terbatas. Paduan antara besi dan karbon dapat membentuk larutan padat (*solid solution*), senyawa interstisial (*interstitial compound*), struktur eutektik maupun eutektoid, dan juga struktur karbon yang terpisah sebagai grafit. Oleh sebab itu, ada dua jenis diagram fasa besi-karbon, yaitu diagram fasa Fe-Fe₃C (karbida besi) dan diagram fasa Fe-FeC (grafit). Jenis yang paling penting dalam dunia teknik dan banyak digunakan adalah diagram fasa Fe-Fe₃C.

Pada keadaan yang benar-benar ekuilibrium, karbon akan berupa karbon bebas (grafit), sehingga diperoleh diagram fasa Fe-FeC. Namun, perubahan yang terjadi dalam keadaan ekuilibrium berlangsung dalam waktu yang sangat lama. Karbida besi sebagai struktur yang bersifat metastabil akan terurai menjadi besi dan grafit, namun perubahan ini bisa dikatakan tidak akan terjadi pada temperatur kamar (Avner, 1974).



Gambar 2.2 Diagram fasa Fe-Fe₃C (Callister, 2014).

Pada Gambar 2.2 dapat dilihat transformasi ekuilibrium baja 0,4% C. Dari *liquid*, pembekuan terjadi pada temperatur sekitar 1500°C dengan terbentuknya ferrit delta. Kemudian, ferrit delta berubah menjadi austenit pada temperatur 1496°C. Tahap pembekuan selesai ketika *liquid* yang tersisa berubah menjadi austenit sehingga struktur keseluruhan adalah austenit. Perubahan kembali terjadi pada garis A₃, dimana austenit mulai berubah menjadi ferrit. Hal ini ditandai dengan pengintian ferrit pada batas butir austenit. Perubahan ini terjadi karena turunnya batas kelarutan karbon dalam austenit, sehingga austenit harus mengeluarkan karbonnya dan berubah menjadi ferrit. Kemudian pada garis A₁ terjadi reaksi eutektoid, dimana sisa austenit yang belum bertransformasi akan berubah menjadi perlit. Perlit adalah sebuah struktur campuran antara ferrit dan sementit (Fe₃C) (Callister dan Rethwisch, 2014).

2.4 Perlakuan Panas

Perlakuan panas adalah sebuah kombinasi proses pemanasan dan pendinginan dengan waktu yang terukur untuk menghasilkan sifat yang diinginkan (Avner, 1974). Proses yang berbeda juga akan menghasilkan sifat yang berbeda pula. Dalam perlakuan panas, setidaknya ada 3 tahapan, yaitu:

1. Pemanasan (*heating*) hingga temperatur tertentu sesuai dengan perlakuan panas yang dilakukan, dan dengan laju pemanasan (*rate of heating*) yang sesuai dengan kriteria benda kerja.
2. Menahan temperatur dalam durasi tertentu (*holding time*) untuk menyeragamkan temperatur maupun struktur benda kerja.
3. Pendinginan (*cooling*) dengan laju pendinginan tertentu sesuai dengan sifat yang diinginkan dari benda kerja (Suherman, 2011).

2.4.1 *Hardening*

Pengerasan merupakan proses perlakuan panas yang berfungsi untuk menaikkan kekerasan benda kerja dengan melakukan pendinginan yang bersifat *non-equilibrium*. Proses ini dilakukan dengan memanaskan benda kerja hingga temperatur austenisasi, menahannya selama beberapa waktu (*holding*), kemudian dilakukan pendinginan dengan laju tertentu sesuai kekerasan yang diinginkan (Suherman, 2003). Laju pendinginan yang cepat akan menghasilkan struktur martensit yang bersifat keras dan getas, sementara laju pendinginan lebih lambat akan menghasilkan struktur ferrit dan perlit dengan sifat yang lebih lunak dan ulet.

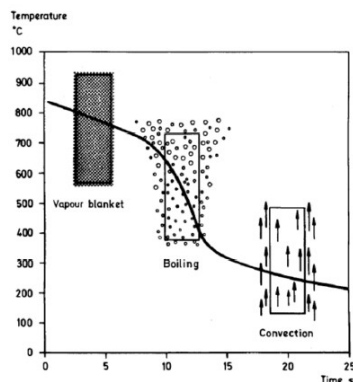
2.4.2 *Austenizing*

Pada proses austenisasi, baja dipanaskan hingga temperatur dimana strukturnya berubah menjadi austenit. Untuk mengubah sifat mekanik berdasarkan struktur mikro, maka proses ini perlu dilakukan karena struktur yang dihasilkan setelah perlakuan panas merupakan produk transformasi dari austenit.

Untuk baja hipoeutektoid yang akan di-*hardening*, material dipanaskan hingga 30-50°C diatas temperatur A_3 , sementara untuk baja hipereutektoid material dipanaskan hingga 30-50°C diatas A_1 (Totten, 2007). Kemudian perlu dilakukan *holding* untuk memberikan karbon kesempatan untuk berdifusi sehingga austenit yang dihasilkan lebih homogen. Menurut ASM Handbook Vol. IV (1991), temperatur austenisasi yang direkomendasikan untuk baja AISI 4140 sebesar 845-870°C.

2.4.3 Quenching

Quenching adalah proses pendinginan cepat yang dilakukan untuk mendapatkan struktur martensitik. Laju pendinginannya lebih cepat dari laju pendinginan kritis baja (*CCR*) sehingga diharapkan hasil akhir strukturnya 100% martensit. Biasanya *quenching* dilakukan dengan mencelupkan benda kerja ke dalam media pendingin berupa *liquid* setelah diaustenisasi. Media pendingin yang umum digunakan adalah oli, air, dan larutan garam (*brine*) dengan konsentrasi 5-10% (Thelning, 1984). Ketika benda kerja di-*quench* ke dalam media pendingin, ada tiga tahapan yang terjadi, yaitu: *vapor blanket stage*, *boiling stage*, dan *convection stage*. Tahapan-tahapan *quenching* ditunjukkan oleh Gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Tiga tahapan *quenching* (Thelning, 1984).

Tahap *vapor blanket* terjadi saat benda kerja masuk ke dalam media pendingin. Temperatur benda yang sangat tinggi akan membuat *liquid* berubah menjadi uap dan membentuk lapisan film tipis yang melingkupi benda kerja. Pada tahap ini, laju pendinginan cenderung rendah karena lapisan film berperan sebagai insulator dan pendinginan terjadi secara radiasi (ASM, 1991). Saat temperatur *liquid* di sekitar benda kerja mencapai titik didih, uap yang terbentuk semakin banyak sehingga lapisan film terlepas. Permukaan benda akan bersentuhan langsung dengan *liquid*, sehingga laju pendinginannya menjadi lebih tinggi. Tahap ini disebut *boiling stage*. Tahapan terakhir adalah *convection stage*. Pada tahap ini, temperatur benda kerja mencapai titik didih *liquid*, dan perpindahan panas terjadi secara konveksi. Selisih temperatur benda kerja dengan *liquid* tinggal sedikit, sehingga laju pendinginannya rendah (Suherman, 2011).

2.4.4 *Tempering*

Tempering adalah proses pemanasan kembali baja yang sebelumnya telah di-*hardening* di bawah temperatur kritisnya kemudian didinginkan dengan laju tertentu. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan keuletan dan ketangguhan baja. Selain itu, juga untuk mengurangi tegangan sisa dan kekerasan baja (ASM, 1991). Menurut Totten (2007), ada 4 tahapan dalam tempering, yaitu:

1. Pada tahap pertama (100-200°C), karbon berpresipitasi keluar dari martensit membentuk partikel karbida epsilon (ϵ).
2. Pada tahap kedua (200-350°C), austenit sisa yang terdapat dalam baja akan terdekomposisi menjadi ferit dan sementit.
3. Pada tahap ketiga (250-750°C), terjadi presipitasi sementit (Fe_3C) di dalam martensit. Pada baja paduan, terbentuk karbida M_3C ("M" merujuk pada unsur paduan tambahan seperti Cr, Mn, dll.). Dengan terbentuknya

karbida, maka karbon dalam martensit akan habis dan struktur BCT-nya hilang.

4. Tahap keempat biasanya terjadi pada baja paduan tinggi. Diatas 700°C akan terbentuk karbida yang lebih stabil seperti M_7C_3 dan M_{23}C_6 . Pada baja yang mengandung Cr, Mo, W, V, dan Ti, terbentuknya karbida ini akan menimbulkan *secondary hardening*.

2.5 Metode Taguchi

Metode *Taguchi* merupakan sebuah metode optimasi yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas produk dan proses, serta menekan penggunaan biaya dan sumber daya (*resources*) seminimal mungkin (Sidi dan Wahyudi, 2013). Metode ini merupakan *off-line quality control*, atau pengendalian kualitas yang bersifat preventif sebagai desain produk atau proses sebelum sampai pada tahap produksi (Roy, 2010). Konsep kualitas dalam metode *Taguchi* ada tiga, yaitu:

1. Kualitas harus didesain ke dalam produk dan bukan sekedar inspeksi terhadap produk. Maksudnya adalah peningkatan kualitas harus direncanakan sejak awal sebelum produksi. Kualitas produk yang buruk tidak akan bisa ditingkatkan dengan inspeksi ataupun penyortiran (*screening*).
2. Kualitas terbaik dicapai dengan meminimalkan deviasi dari target. Produk harus didesain sedemikian rupa agar tidak sensitif terhadap faktor-faktor yang tidak terkontrol (*robustness of product*).
3. Biaya kualitas diukur sebagai fungsi dari deviasi terhadap target, sementara kerugian diukur dari keseluruhan sistem. Maksudnya adalah biaya *life cycle* dari sebuah produk yang meliputi bahan baku, pengerjaan, inspeksi, pengembalian, garansi, dan penggantian produk.

Untuk mendapatkan kualitas produk yang diinginkan dengan berbasis pada desain, Taguchi merekomendasikan tiga tahapan proses sebagai berikut:

1. *System design*. Objektif dari tahap ini adalah penentuan tingkatan kerja (level) yang sesuai dari setiap faktor desain. Hal ini didasarkan pada material, alat kerja, dan juga parameter produk atau proses yang digunakan.
2. *Parameter design*. Objektif dari tahap ini menentukan level faktor yang menghasilkan hasil terbaik. Kondisi optimum dipilih agar meminimalkan variasi hasil akibat pengaruh faktor yang tidak terkontrol.
3. *Tolerance design*. Objektif dari tahap ini adalah untuk memperbaiki hasil desain parameter dengan memperketat toleransi dari faktor yang memiliki pengaruh terbesar terhadap produk.

2.5.1 Perancangan Eksperimen

Menurut Sidi dan Wahyudi (2013), desain eksperimen merupakan evaluasi dua atau lebih faktor (parameter) secara serentak terhadap kemampuan untuk memengaruhi variabilitas hasil dari karakteristik produk atau proses tertentu. Perancangan eksperimen yang melibatkan banyak faktor secara konvensional sangat tidak efisien karena membutuhkan banyak waktu dan biaya. Metode *Taguchi* menawarkan langkah-langkah untuk merancang eksperimen secara sistematis dan efisien sebagai berikut:

1. Perumusan masalah.
2. Tujuan eksperimen.
3. Mengidentifikasi faktor bebas dan faktor terikat.
4. Menentukan level untuk setiap faktor.
5. Merancang *orthogonal array*. Fungsinya adalah desain *layout* eksperimen yang akan dilakukan (Suryo dkk., 2018). *Orthogonal array* juga digunakan untuk menentukan jumlah eksperimen minimal yang dapat memberi informasi sebanyak mungkin mengenai parameter yang digunakan.
6. Persiapan dan pelaksanaan eksperimen.
7. Analisis data menggunakan *S/N ratio* dan *ANOVA*.

8. Interpretasi hasil. Berupa level faktor atau parameter optimum serta persentase kontribusi terhadap hasil akhir.
9. Uji konfirmasi. Yaitu melakukan eksperimen dengan menggunakan parameter-parameter optimum.

2.5.2 S/N Ratio

S/N ratio merupakan desain untuk mengubah data hasil eksperimen menjadi nilai yang menunjukkan karakteristik kualitas (Shahavi dkk., 2015). *S/N ratio* digunakan untuk menentukan level faktor yang memengaruhi hasil eksperimen (Suryo dkk., 2018). Menurut Roy (2010), ada tiga kategori karakteristik kualitas, yaitu:

1. *Smaller is better*. Contohnya adalah *shrinkage* (penyusutan) minimum pada benda hasil coran.
2. *Nominal is best*. Contohnya adalah dimensi sebuah komponen yang mempunyai nilai tertentu.
3. *Bigger is better*. Contohnya adalah masa pakai maksimum dari sebuah komponen.

Konversi hasil eksperimen menjadi nilai *S/N ratio* memerlukan dua tahap, yaitu menghitung rata-rata kuadrat deviasi (*MSD*) dan menghitung *S/N ratio* dari *MSD* menggunakan persamaan,

$$S/N = -10 \log_{10} (MSD) \quad (2.1)$$

Nilai *MSD* untuk setiap karakteristik kualitas berbeda-beda. Rumus *MSD* untuk setiap karakteristik kualitas adalah sebagai berikut:

1. Untuk karakteristik *smaller is better*:

$$MSD = \frac{Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2}{N} \quad (2.2)$$

2. Untuk karakteristik *nominal is the best*:

$$MSD = (Y_1 - Y_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + \dots + \frac{(Y_n - Y_0)^2}{N} \quad (2.3)$$

3. Untuk karakteristik *bigger is better*:

$$MSD = \frac{1/Y_1^2 + 1/Y_2^2 + \dots + 1/Y_n^2}{N} \quad (2.4)$$

Dimana,

Y: hasil eksperimen

N: jumlah eksperimen

Y_0 : nilai target

Salah satu keuntungan analisis menggunakan *S/N ratio* dibandingkan menggunakan rata-rata hasil eksperimen adalah *S/N ratio* menggabungkan antara dua parameter kualitas, yaitu jarak nilai hasil dengan target dan persebaran data, menjadi satu. Sehingga *S/N ratio* memberikan cara yang objektif untuk melihat dua parameter kualitas secara bersamaan.

2.5.3 ANOVA

Analisis dengan *S/N ratio* hanya memberikan rekomendasi kombinasi parameter yang dapat menghasilkan hasil optimum, namun tidak dapat memberikan informasi terkait signifikansi parameter yang digunakan. Dengan menggunakan *ANOVA*, dapat diketahui signifikansi parameter yang digunakan melalui persentase kontribusi terhadap hasil akhir (Patel dkk, 2018). Persentase kontribusi dari setiap parameter atau faktor dapat dicari dengan rumus berikut,

$$P_{a,b,c,...,n} = S_{a,b,c,...,n} / S_t \times 100\% \quad (2.5)$$

Dimana,

$P_{a,b,c,...,n}$: persentase kontribusi setiap faktor

$S_{a,b,c,...,n}$: *factor's sum of square*

S_t : *total sum of square*

2.6 Metode Pengujian

2.6.1 Pengujian Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan metode *Vickers* menggunakan indenter intan berbentuk piramida dengan sudut sebesar 136° , sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Bentuk indenter dan hasil indentasi *Vickers* (Dieter, 1988).

Vickers Hardness Number (VHN) didapatkan melalui hasil pembagian antara beban yang digunakan dengan luas area indentasi. Luas area indentasi ini didapatkan melalui panjang diagonal hasil indentasinya (Dieter, 1988). Pengujian kekerasan *Vickers* menggunakan standar ASTM E92. Secara matematis, perhitungan VHN dapat dinyatakan seperti Persamaan 2.6 di bawah ini.

$$VHN = \frac{2P \sin \left(\frac{\theta}{2} \right)}{L^2} = \frac{1,854P}{L^2} \quad (2.6)$$

Dimana,

- P : beban yang digunakan
L : panjang rata-rata diagonal (mm)

2.6.2 Pengujian Metalografi

Metalografi adalah suatu analisis dari struktur dan komponen fisis logam atau paduan yang dapat diamati langsung secara visual maupun dengan bantuan alat seperti mikroskop optik, mikroskop elektron, dan difraksi sinar-x (Tiandho dkk., 2018).

Menurut ASM Handbook Vol. 9 (2004), tahapan uji metalografi adalah sebagai berikut.

1. *Sectioning* (pemotongan). Merupakan proses pengambilan bagian dari objek yang lebih besar sebagai spesimen dengan ukuran yang sesuai.
2. *Mounting* untuk spesimen berukuran kecil untuk mempermudah *handling* saat *grinding* maupun *polishing*. Tahapan ini dilakukan dengan mengenkapsulasi spesimen dalam material polimer atau menjepitnya dengan alat mekanik.
3. *Grinding*, yaitu proses penghilangan cacat pada permukaan spesimen menggunakan media abrasif.
4. *Polishing*. Yaitu pemolesan permukaan spesimen dengan partikel abrasif yang tersuspensi dalam fluida untuk menghasilkan permukaan yang bersih dan mengkilap.
5. *Etching*. Disebut juga *metallographic contrasting*, untuk menampakkan struktur dari spesimen ketika diamati dengan mikroskop optik.

2.6.3 Pengujian OES

Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES) bertujuan untuk menentukan kandungan atau komposisi unsur-unsur logam dalam suatu bahan paduan logam, baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Prinsip dari pengujian ini adalah mengeksitasi atom-atom logam melalui proses pembakaran lokal pada permukaan bahan. Pembakaran ini menyebabkan molekul senyawa menguap dan terurai menjadi atom-atom unsur. Atom-atom yang tereksitasi ini memancarkan energi dalam bentuk sinar, yang merupakan karakteristik dari setiap unsur logam. Sedangkan intensitas sinar tersebut sebanding dengan kadar atau konsentrasi suatu unsur dalam sebuah bahan (Anggraini dkk., 2005). Sehingga melalui pengujian OES dapat diketahui unsur apa saja yang terkandung dalam suatu paduan logam sekaligus persentase dari setiap unsur tersebut.

2.7 Penelitian Sebelumnya

Dibawah ini adalah beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan metode *Taguchi* untuk optimasi parameter perlakuan panas terhadap kekerasan baja tertentu.

2.7.1 Optimasi Parameter Perlakuan Panas Terhadap Kekerasan Baja AISI 4140 Untuk Aplikasi *Bucket Teeth Excavator*

Penelitian yang dilakukan Sumar Hadi Suryo dkk. (2018) ini bertujuan untuk mendapatkan kekerasan maksimum dari baja AISI 4140 yang digunakan untuk aplikasi *bucket teeth excavator*. Standar kekerasan material untuk aplikasi ini adalah sebesar 40 HRc. Parameter perlakuan panas yang digunakan adalah temperatur austenisasi dengan variasi 830, 850, dan 880°C; *holding time* austenisasi dengan variasi waktu 30, 45, dan 60 menit; media *quenching* dengan variasi berupa oli, air, dan air garam; serta temperatur tempering dengan variasi 400, 500, dan 600°C. Desain *layout* eksperimen menggunakan *orthogonal array L9* dengan dua kali repetisi per eksperimennya (N=3). Setelah melakukan analisis menggunakan *S/N ratio*, didapatkan kombinasi parameter optimum yaitu temperatur austenisasi 830°C, *holding time* 45 menit, media *quenching* oli, dan temperatur *tempering* 400°C. Dari analisis *ANOVA* didapatkan bahwa parameter yang memengaruhi hasil adalah temperatur *tempering* dengan persentase kontribusi 96%, dan media *quenching* dengan persentase kontribusi 1,5%. Setelah dilakukan uji konfirmasi, didapatkan rata-rata kekerasan spesimen optimum adalah sebesar 46,03 HRc.

2.7.2 Optimasi Parameter Perlakuan Panas Terhadap Kekerasan Baja En-31 *High Manganese Steel*

Vimal B. Patel dkk. (2018) melakukan penelitian menggunakan metode *Taguchi* untuk menganalisis kombinasi parameter perlakuan panas yang optimum untuk baja En-31. Parameter yang digunakan adalah temperatur austenisasi dengan variasi 770, 820, dan 870°C; media *quenching* dengan variasi

berupa air, oli, dan udara; serta temperatur *tempering* dengan variasi 170, 220, dan 270°C. Desain *layout* eksperimen menggunakan *orthogonal array L9* tanpa repetisi. Setelah melakukan analisis menggunakan *S/N ratio*, didapatkan kombinasi parameter optimum yaitu temperatur austenisasi 870°C, media *quenching* air, dan temperatur *tempering* 170°C. Dari analisis *ANOVA*, didapatkan persentase kontribusi dari setiap parameter, yaitu sebesar 3,76% untuk temperatur austenisasi; 95,66% untuk media *quenching*, dan 0,56% untuk temperatur *tempering*.

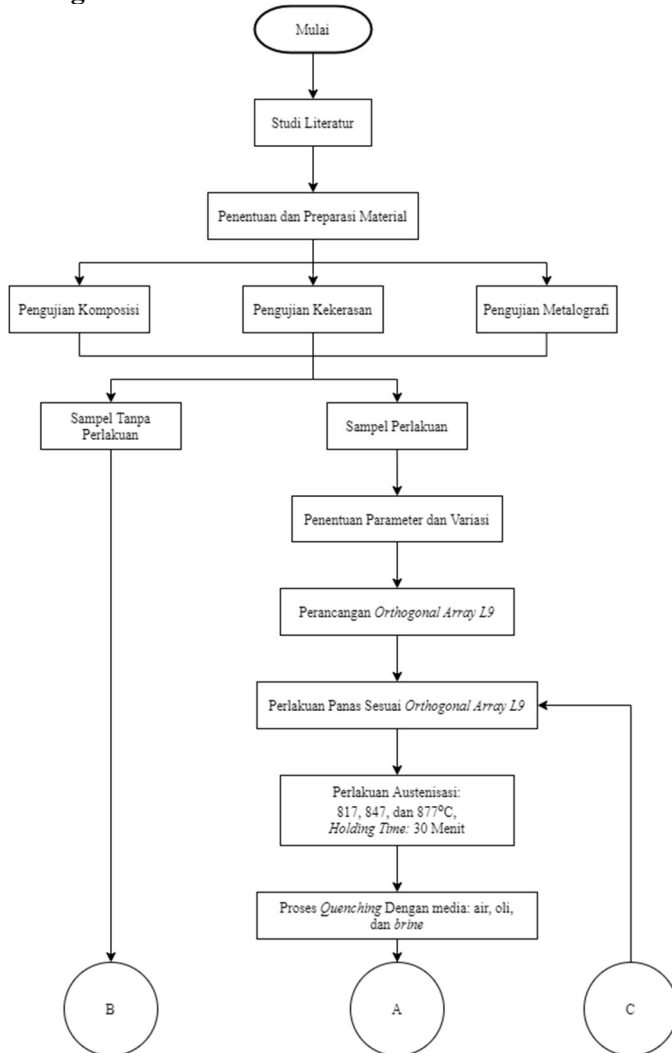
2.7.3 Optimasi Parameter Perlakuan Panas Terhadap Kekerasan Baja Karbon Menengah

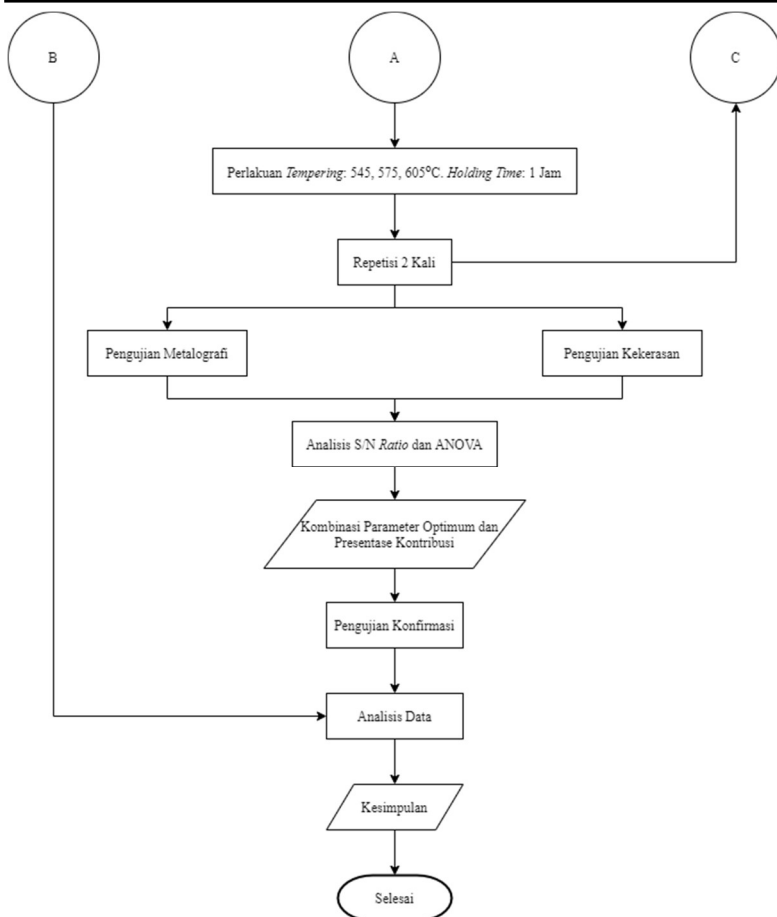
Ajay Kumar dkk. (2016) melakukan penelitian menggunakan metode *Taguchi* untuk menganalisis kombinasi parameter perlakuan panas optimum dan signifikansi dari setiap parameter tersebut. Parameter yang digunakan adalah temperatur austenisasi dengan variasi 850, 900, dan 950°C; *holding time* austenisasi dengan variasi waktu 60, 90, dan 120 menit; serta temperatur media *quenching* dengan variasi 10, 20, dan 30°C. Sementara parameter terikat adalah media *quenching* menggunakan air, dan temperatur serta *holding time tempering* sebesar 650°C dan 60 menit. Desain *layout* eksperimen menggunakan *orthogonal array L9* tanpa repetisi. Melalui analisis *S/N ratio*, didapatkan kombinasi parameter optimum yaitu temperatur austenisasi 950°C, *holding time* austenisasi 60 menit, dan temperatur media *quenching* 30°C. Dari analisis *ANOVA* diketahui bahwa temperatur austenisasi memiliki pengaruh terbesar terhadap kekerasan baja. Setelah dilakukan uji konfirmasi menggunakan kombinasi parameter optimum, didapatkan kekerasan baja sebesar 39,25 HRC.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



**Gambar 3.1** Diagram alir

3.2 Bahan Penelitian

Adapun beberapa bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Baja AISI 4140 diameter 1"
2. Larutan Etsa Nital 4%
3. Amplas *Grade* 80-2000

4. Kain Beludru
5. Autosol *Metal Polish*
6. Oli SAE 40
7. Larutan *brine* 5%

3.3 Alat Penelitian

Adapun beberapa alat yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Mesin Pemotong
Digunakan untuk memotong material yang akan dijadikan sampel penelitian. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 di bawah ini.



Gambar 3.2 Mesin pemotong (Dokumentasi pribadi, 2020).

2. Mesin *Grinding-Polish*
Digunakan untuk preparasi permukaan sampel. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 di bawah ini.



Gambar 3.3 Mesin *Grinding-Polish* (Future-Tech, 2011).

3. *Optical Emission Spectroscopy* (OES)

Digunakan untuk mengetahui komposisi kimia material yang digunakan. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 di bawah ini.



Gambar 3.4 Mesin OES (Azizi, 2019).

4. Mesin Uji Kekerasan

Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan material. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5 di bawah ini.



Gambar 3.5 Mesin HBRV *Universal Hardness Tester* 187.5A
(Dokumentasi pribadi, 2020).

5. Mikroskop Optik
Digunakan untuk melihat struktur mikro material. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 di bawah ini.



Gambar 3.6 Mikroskop optik Olympus BX51M
(Dokumentasi pribadi, 2020).

6. *Furnace* Elektrik
Digunakan dalam perlakuan panas material, khususnya dalam austenisasi dan *tempering*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7 di bawah ini.



Gambar 3.7 *Furnace* elektrik (Dokumentasi pribadi, 2020)

3.4 Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, ada beberapa tahapan proses yang perlu dilakukan. Pertama adalah penentuan parameter dan variasi dari setiap parameter, kemudian perancangan *orthogonal array L9* sebagai *layout* eksperimen, selanjutnya adalah analisa hasil eksperimen menggunakan *S/N ratio* dan *ANOVA*. Terakhir adalah melakukan uji konfirmasi. Setiap proses tersebut akan dijelaskan pada bagian di bawah ini.

3.4.1 Preparasi Material

Preparasi material dilakukan dengan melakukan pemotongan (*cutting*) pada material baja AISI 4140 dengan ketebalan sekitar 1,5 cm. Selanjutnya, pada material ini akan dilakukan pengujian komposisi, pengujian kekerasan, dan pengujian metalografi.

3.4.2 Penentuan Parameter dan Variasi

Tabel 3.1 Parameter yang digunakan dan variasinya

| Parameter | Level | | |
|------------------------|-------|-----|--------------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Temp. Austenisasi | 817 | 847 | 877 |
| Media <i>Quenching</i> | Oli | Air | <i>Brine</i> |
| Temp. <i>Tempering</i> | 545 | 575 | 605 |

Dalam metode *Taguchi*, perencanaan eksperimen merupakan tahapan yang sangat penting. Salah satu proses dalam perencanaan eksperimen adalah penentuan parameter dan variasinya. Pada Tabel 3.1 disajikan parameter dan variasi parameter yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu menggunakan tiga parameter dengan tiga variasi atau level untuk setiap parameternya. Untuk parameter temperatur austenisasi menggunakan variasi 817, 847, dan 877°C. Untuk media *quenching* menggunakan variasi oli, air, dan *brine*. Dan untuk temperatur tempering menggunakan variasi 545, 575, dan 605°C. Parameter terikat untuk penelitian ini adalah *holding time* austenisasi selama 30 menit, dan *holding time tempering* selama 1 jam.

3.4.3 Perancangan *Orthogonal Array*

Penggunaan tiga parameter dan tiga level per parameternya, jika menggunakan metode konvensional membutuhkan 3^3 eksperimen atau 27 kali percobaan untuk dapat mengetahui kombinasi parameter yang hasilnya optimum. Dengan metode *Taguchi*, penelitian dapat dilakukan secara lebih efisien dengan melakukan perancangan *orthogonal array*.

Tabel 3.2 *Orthogonal array L9*

| Eksperimen | Temp. Austenisasi | Media <i>Quenching</i> | Temp. <i>Tempering</i> | <i>Output</i> |
|------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1 | 817 | Oli | 575 | Kekerasan (HV) |
| 2 | 817 | Air | 605 | |
| 3 | 817 | <i>Brine</i> | 545 | |
| 4 | 847 | Oli | 605 | |
| 5 | 847 | Air | 545 | |
| 6 | 847 | <i>Brine</i> | 575 | |
| 7 | 877 | Oli | 545 | |
| 8 | 877 | Air | 575 | |
| 9 | 877 | <i>Brine</i> | 605 | |

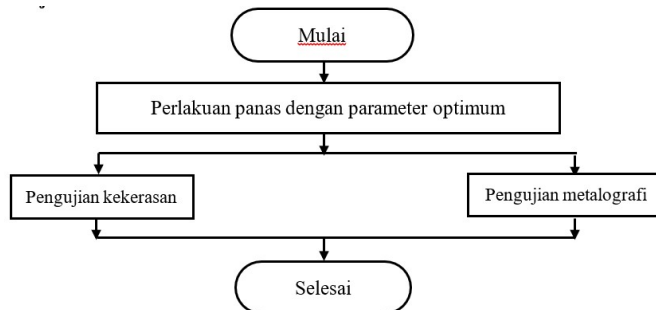
Tabel 3.2 merupakan rancangan *orthogonal array* untuk penelitian ini. Karena menggunakan tiga parameter dan tiga level, maka menggunakan model L9. Dengan menggunakan model ini, hanya perlu melakukan 9 kali eksperimen dari yang seharusnya 27 kali eksperimen. Masing-masing eksperimen merupakan kombinasi dari tiga parameter dan tiga faktor, dan seluruhnya berbeda satu sama lain. Pada penelitian ini, setiap eksperimen dilakukan sebanyak tiga kali (dua kali repetisi) untuk meningkatkan validitas data.

3.4.4 Analisis *S/N Ratio* dan *ANOVA*

Setelah melakukan perlakuan panas sesuai *orthogonal array*, dilakukan pengujian kekerasan dari setiap sampel eksperimen. Selanjutnya, data kekerasan tersebut diubah ke dalam bentuk *S/N ratio* menggunakan Rumus 2.1 dengan karakteristik *MSD bigger is better* karena hasil akhir yang ingin diketahui adalah kekerasan maksimum. *Output* dari analisis *S/N ratio* adalah kombinasi parameter optimum. Untuk mengetahui signifikansi dari setiap parameter, dilakukan analisis lanjutan

menggunakan *ANOVA*. *Output* dari analisis *ANOVA* adalah persentase kontribusi dari setiap parameter yang dapat dicari menggunakan Rumus 2.5..

3.4.5 Pengujian Konfirmasi



Gambar 3.8 Diagram alir pengujian konfirmasi

Tujuan dilakukannya pengujian konfirmasi adalah untuk membuktikan validitas dari hasil yang didapatkan pada tahap analisa *S/N ratio* dan *ANOVA*. Tahapan dari pengujian konfirmasi digambarkan pada Gambar 3.8 diatas. Proses ini dilakukan dengan melakukan perlakuan panas menggunakan kombinasi parameter optimum. Kemudian, dilakukan pengujian dengan hasil utama berupa kekerasan dan data pendukung berupa hasil metalografi. Selanjutnya, kekerasan sampel optimum akan dibandingkan dengan hasil prediksi untuk mengetahui kesesuaiannya.

3.5 Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa proses karakterisasi untuk mendapatkan data pendukung penelitian ini. Jenis-jenis pengujian yang dilakukan akan dijelaskan pada bagian di bawah ini.

3.5.1 Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi dilakukan untuk mengetahui komposisi material yang digunakan, apakah sesuai dengan standar yang ditetapkan atau tidak. Pengujian ini dilakukan dengan alat *Optical Emission Spectroscopy* (OES) di PT. Logamindo Sarimulya, Gedangan, Sidoarjo.

3.5.2 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro sampel. Pengujian ini diawali dengan melakukan preparasi permukaan spesimen menggunakan amplas grade 80-2000 untuk menghilangkan *surface defect*. Selanjutnya dilakukan pemolesan menggunakan autosol untuk menghilangkan *minor scratch* dan mengkilapkan permukaan. Kemudian, dilakukan pengetsan menggunakan nital 4% untuk menampakkan struktur (*contrasting*) dari sampel. Terakhir, dilakukan pengamatan menggunakan mikroskop optik. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM E407.

3.5.3 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui kekerasan dari sampel dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada permukaan sampel. Pengujian ini menggunakan metode *Vickers*, dengan indenter intan bersudut 136° , pembebanan 100 kgf, dan waktu indentasi 10 detik dengan mengacu pada standar ASTM E92. Pengujian ini dilakukan dengan alat *Universal Hardness Tester* HBRV 187.5A di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.



Gambar 3.9 Skema pengujian kekerasan (Dokumentasi pribadi, 2020).

Pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan pada permukaan sampel sebanyak 4 kali indentasi dengan jarak antar indentasi kurang lebih 3,5 mm dari bagian tepi hingga tengah sampel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9.

3.6 Rancangan Penelitian

Tabel 3.3 Rancangan penelitian

| Sampel | Temp. Austen isasi | Media <i>Quenching</i> | Temp. <i>Tempering</i> | Pengujian | | |
|--------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|------------------|--------------------|
| | | | | Uji Komposisi | Uji Kekerasan | Uji Metalografi |
| TP | - | - | - | V | V | V |
| 1 | 817 | Oli | 575 | - | V | - |
| 2 | 817 | Air | 605 | - | V | - |
| 3 | 817 | <i>Brine</i> | 545 | - | V | V |
| 4 | 847 | Oli | 605 | - | V | V |
| 5 | 847 | Air | 545 | - | V | - |
| 6 | 847 | <i>Brine</i> | 575 | - | V | - |
| 7 | 877 | Oli | 545 | - | V | - |
| 8 | 877 | Air | 575 | - | V | - |

| | | | | | | |
|----|-----|--------------|-----|---|---|---|
| 9 | 877 | <i>Brine</i> | 605 | - | V | - |
| OP | Op | Op | Op | - | V | V |

Keterangan:

- TP : tanpa perlakuan
- OP : sampel optimum
- Perlakuan panas sampel optimum menggunakan kombinasi parameter hasil analisa *S/N ratio* (Op).

3.7 Jadwal Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama 6 bulan, dimulai dari bulan Desember 2019 hingga bulan Mei 2020. Rincian jadwal penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.4 di bawah ini.

Tabel 3.4 Jadwal penelitian

| Kegiatan | Bulan | | | | | |
|------------------------------------|----------|---------|----------|-------|-------|-----|
| | Desember | Januari | Februari | Maret | April | Mei |
| Studi Literatur | | | | | | |
| Konsultasi Kepada Dosen Pembimbing | | | | | | |
| SPreparasi Spesimen | | | | | | |
| Pengujian Komposisi | | | | | | |
| Pengujian Kekerasan | | | | | | |
| Pengujian Metalografi | | | | | | |

| | | | | | | |
|--------------------------|--|--|--|--|--|--|
| Perlakuan Panas | | | | | | |
| Penyusunan Laporan Akhir | | | | | | |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Sampel Tanpa Perlakuan

Pada sampel yang tidak diberi perlakuan, dilakukan tiga jenis pengujian yaitu pengujian komposisi, pengujian metalografi, dan pengujian kekerasan.

4.1.1 Hasil Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi dilakukan untuk mengetahui komposisi dari suatu material. Pengujian ini dilakukan dengan alat *Optical Emission Spectroscopy* (OES) di PT. Logamindo Sarimulya, Sidoarjo. Tabel 4.1 berikut adalah hasil pengujian komposisi pada material yang digunakan.

Tabel 4.1 Hasil uji komposisi

| Unsur | Kandungan (%) | | |
|-------|---------------|-----------|-----------|
| | Hasil Uji | ASTM A29 | ASSAB 709 |
| C | 0,405 | 0,38-0,43 | 0,4 |
| Mn | 0,83 | 0,75-1,00 | 0,8 |
| P Max | 0,0209 | 0,035 | - |
| S Max | 0,0138 | 0,04 | - |
| Si | 0,237 | 0,15-0,35 | 0,2 |
| Ni | 0,019 | - | - |
| Cr | 0,92 | 0,8-1,10 | 1,0 |
| Mo | 0,185 | 0,15-0,25 | 0,2 |

Pada Tabel 4.1 dapat diketahui bahwasanya material AISI 4140 yang digunakan pada penelitian ini telah sesuai dengan standar ASTM A29 maupun ASSAB 709. AISI 4140 merupakan jenis baja paduan rendah dengan unsur paduan tambahan berupa kromium dan molibdenum. Menurut Totten (2007), penambahan unsur kromium yang merupakan unsur pembentuk karbida dapat meningkatkan *hardenability*, ketahanan korosi, dan juga ketahanan abrasi baja. Kemudian,

penambahan molibdenum yang juga merupakan unsur pembentuk karbida akan menghasilkan baja dengan ukuran butir yang halus (*fine-grained*) serta meningkatkan *hardenability*.

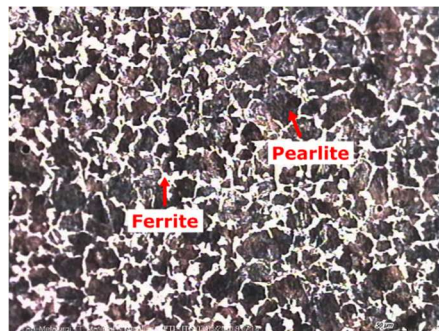
4.1.2 Hasil Pengujian Kekerasan dan Metalografi

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *Vickers* dengan pembebanan 100 kgf dan waktu indentasi 10 detik. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil uji kekerasan sampel tanpa perlakuan

| Sampel | Kekerasan per titik (HV) | | | | Rata-rata (HV) |
|--------|--------------------------|-----|-----|-----|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| TP | 300 | 299 | 290 | 280 | 292,5 |

Pengujian kekerasan dilakukan sebanyak 4 titik sesuai skema pada Gambar 3.9. Sampel baja AISI 4140 tanpa perlakuan memiliki kekerasan sebesar 292,5 HV, sehingga masih belum memenuhi persyaratan untuk aplikasi poros pompa sentrifugal sebesar 302-372 HV.



Gambar 4.1 Struktur mikro sampel tanpa perlakuan (perbesaran 500x, etsa nital)

Sampel AISI 4140 tanpa perlakuan memiliki struktur berupa ferrit (bagian terang) dan *pearlite* (bagian gelap). Kedua struktur ini terbentuk melalui pendinginan yang lambat, sehingga austenit dapat bertransformasi secara ekuilibrium. Ferrit yang berwarna terang merupakan struktur proeutektoid yang berasal dari perubahan allotropi austenit secara langsung. Pada diagram fasa Fe-Fe₃C, ketika temperatur turun melewati garis A₃, austenit akan berubah menjadi ferrit. Seiring turunnya temperatur, maka ferrit yang ada akan tumbuh semakin besar. Karena ferrit memiliki kelarutan karbon yang sedikit, maka austenit yang berubah menjadi ferrit harus mengeluarkan karbonnya menuju austenit yang belum bertransformasi, sehingga saat mendekati garis A₁, komposisi austenit sisa akan sama dengan komposisi eutektoid (0,8 % C). Ketika melewati garis A₁, austenit yang tersisa akan mengalami reaksi eutektoid, menghasilkan struktur yang terdiri atas ferrit dan sementit berselang-seling yang disebut *pearlite* (Suherman, 2003).

4.2 Hasil Pengujian Sampel *Orthogonal Array L9*

Pada sampel *orthogonal array L9*, dilakukan dua jenis pengujian, yaitu pengujian kekerasan dan pengujian metalografi.

4.2.1 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada setiap sampel dari *orthogonal array L9* menggunakan metode *Vickers* dengan pembebanan 100 kgf dan waktu indentasi 10 detik. Titik uji sesuai pada Gambar 3.9. Pada Tabel 4.3 di bawah ini tertera nilai kekerasan dari setiap *trial* untuk setiap sampel dan kekerasan rata-rata per sampel. Rincian kekerasan dari setiap titik dapat dilihat pada bagian lampiran.

Tabel 4.3 Hasil uji kekerasan sampel *orthogonal array L9*

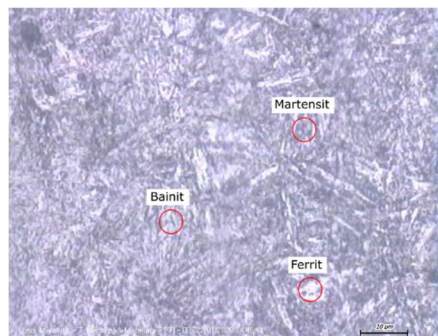
| Sampel | Kekerasan (HV) | | | Rata-rata (HV) |
|--------|----------------|--------|--------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 327,25 | 331,5 | 330,25 | 329,67 |
| 2 | 317,5 | 321,25 | 320,25 | 319,67 |
| 3 | 377,25 | 376,5 | 374 | 375,92 |
| 4 | 313,25 | 314,75 | 318,5 | 315,5 |
| 5 | 363,25 | 363 | 368,25 | 364,83 |
| 6 | 341,25 | 338 | 342 | 340,42 |
| 7 | 364,5 | 358,5 | 360,25 | 361,08 |
| 8 | 341 | 346,25 | 342,75 | 343,33 |
| 9 | 326,5 | 326,75 | 322,75 | 325,33 |

Pada tabel diatas, dapat dilihat secara umum bahwa perlakuan panas yang diberikan kepada baja AISI 4140 dapat meningkatkan kekerasannya hingga memenuhi persyaratan untuk aplikasi poros pompa, bahkan ada yang kekerasannya sedikit melebihi persyaratan. Diantara sampel-sampel *orthogonal array L9*, yang memiliki kekerasan paling tinggi adalah sampel nomor 3 dengan kekerasan rata-rata sebesar 375,92 HV. Sampel nomor 3 diberi perlakuan panas dengan variasi parameter temperatur austenisasi 817°C, media *quenching brine*, dan temperatur *tempering* 545°C. Sementara itu, sampel yang memiliki kekerasan terendah adalah sampel nomor 4 dengan kekerasan rata-rata sebesar 315,5 HV. Sampel nomor 4 diberi perlakuan panas dengan variasi parameter temperatur austenisasi 847°C, media *quenching oli*, dan temperatur *tempering* 605°C. Dari segi temperatur austenisasi, sampel nomor 4 lebih unggul dari sampel nomor 3 karena temperatur austenisasi yang lebih tinggi dapat melarutkan karbon lebih banyak ke dalam austenit, sehingga kekerasan baja setelah *quenching* dapat meningkat (Totten, 2007). Namun, hasilnya berbeda karena kedua sampel juga memiliki perbedaan dalam

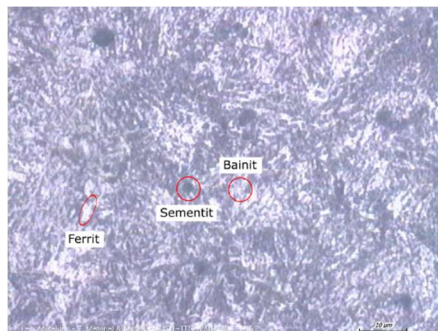
media *quenching* dan temperatur *tempering*. Sampel nomor 3 yang di-*quench* dengan *brine* memiliki kekerasan yang lebih tinggi karena *brine* memiliki laju pendinginan yang jauh lebih cepat daripada oli. Hal ini ditunjukkan oleh nilai H (*severity of quench*) dari *brine* dalam keadaan tanpa agitasi sebesar 2, sementara oli hanya sebesar 0,25 - 0,3 (Thelning, 1984). Kemudian, dari segi temperatur *tempering*, sampel nomor 4 yang di-*temper* dengan temperatur lebih tinggi akan cenderung mengalami dekomposisi martensit yang lebih banyak dibandingkan sampel nomor 3. Pada temperatur yang lebih tinggi, martensit akan berdekomposisi menjadi struktur yang lebih rendah kekerasannya seperti ferrit dan sementit (Suherman, 2011).

4.2.2 Hasil Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi pada sampel *orthogonal array L9* dilakukan pada sampel yang memiliki kekerasan tertinggi dan terendah, yaitu sampel nomor 3 dan nomor 4.



Gambar 4.2 Struktur mikro sampel nomor 3 (perbesaran 1000x, etsa nital)



Gambar 4.3 Struktur mikro sampel nomor 4 (perbesaran 1000x, etsa nital)

Ditunjukkan oleh Gambar 4.2, sampel nomor 3 yang di-*temper* pada temperatur lebih rendah memiliki struktur yang terdiri atas martensit, bainit, dan ferrit. Martensit yang terdapat pada sampel ini ukurannya kecil karena telah berdekomposisi menjadi struktur yang lain. Martensit adalah struktur bersifat metastabil, ketika diberikan energi, ia akan cenderung berubah dari BCT menjadi struktur yang stabil yaitu BCC (Suherman, 2011). Pada pemanasan temperatur rendah, karbon yang terperangkap akan keluar membentuk karbida epsilon. Pada temperatur yang lebih tinggi sekitar 204 - 399°C, mulai terbentuk sementit yang sangat halus. Austenit sisa hasil *quenching* akan mulai berubah menjadi bainit, dan juga mulai terbentuk ferrit. Dan pada temperatur yang lebih tinggi (399 – 649°C), partikel sementit akan membesar membentuk spheroid halus. Martensit yang banyak kehilangan karbonnya akan berubah menjadi struktur BCC, yaitu ferrit. Pada Gambar 4.3, sampel nomor 4 yang di-*temper* pada temperatur lebih tinggi, selain terdapat ferrit, juga terdapat beberapa spheroid sementit dan juga bainit. Jarum-jarum martensit sudah tidak terlihat lagi. Ini menunjukkan bahwa martensit telah berdekomposisi seluruhnya dan berubah menjadi struktur yang lebih stabil. Hal ini sesuai dengan hasil uji kekerasan dimana sampel nomor 4 memiliki kekerasan yang lebih rendah dibandingkan sampel nomor 3.

4.3 Analisis *S/N Ratio* dan *ANOVA*

Analisis *S/N Ratio* dan *ANOVA* dilakukan untuk mendapatkan kombinasi parameter optimum dan persentase kontribusi dari tiap parameter terhadap kekerasan baja.

4.3.1 Analisis *S/N Ratio*

Langkah awal dalam analisis ini adalah dengan mengubah data kekerasan sampel *orthogonal array L9* menjadi bentuk *S/N ratio* menggunakan Rumus 2.1. Konversi dalam bentuk *S/N ratio* sangat sesuai digunakan dalam eksperimen yang melibatkan beberapa *trial* karena mampu merepresentasikan kualitas dari data yang didapatkan, salah satunya adalah ukuran sebaran data atau deviasi (Roy, 2010). Nilai *S/N ratio* dari setiap sampel ditunjukkan oleh Tabel 4.4 di bawah ini.

Tabel 4.4 Nilai *S/N ratio* dari setiap sampel

| Sampel | Kekerasan (HV) | | | Rata-rata (HV) | S/N Ratio |
|--------|----------------|--------|--------|-------------------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | 327,25 | 331,5 | 330,25 | 329,67 | 50,3611 |
| 2 | 317,5 | 321,25 | 320,25 | 319,67 | 50,0936 |
| 3 | 377,25 | 376,5 | 374 | 375,92 | 51,5017 |
| 4 | 313,25 | 314,75 | 318,5 | 315,5 | 49,9794 |
| 5 | 363,25 | 363 | 368,25 | 364,83 | 51,2413 |
| 6 | 341,25 | 338 | 342 | 340,42 | 50,6399 |
| 7 | 364,5 | 358,5 | 360,25 | 361,08 | 51,1515 |
| 8 | 341 | 346,25 | 342,75 | 343,33 | 50,7138 |
| 9 | 326,5 | 326,75 | 322,75 | 325,33 | 50,2462 |

Tahap selanjutnya adalah menentukan *S/N ratio* untuk setiap level dari setiap parameter dengan cara menghitung rata-rata *S/N ratio* sampel yang memiliki level dan parameter yang

sama. Nilai S/N ratio untuk level dari tiap parameter ditunjukkan oleh Tabel 4.5 di bawah ini.

Tabel 4.5 Respon S/N ratio untuk level dari tiap parameter

| Level | Temp. Austenisasi | Media <i>Quenching</i> | Temp. <i>Tempering</i> |
|-------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 50,6521 | 50,4973 | 51,2982 |
| 2 | 50,6202 | 50,6829 | 50,5716 |
| 3 | 50,7038 | 50,7959 | 50,1064 |
| Delta | 0,0836 | 0,2986 | 1,1918 |
| <i>Rank</i> | 3 | 2 | 1 |

Delta menunjukkan selisih S/N ratio terbesar dan terkecil dalam tiap parameter. Sementara *rank* menunjukkan urutan parameter yang memiliki delta tertinggi hingga terendah. Secara tidak langsung, *rank* menunjukkan mana parameter yang memiliki pengaruh paling besar terhadap hasil akhir. Sehingga temperatur *tempering* adalah parameter dengan pengaruh paling kuat dan temperatur austenisasi adalah parameter dengan pengaruh paling lemah. Untuk mendapatkan kombinasi parameter optimum, dari setiap parameter dipilih level yang memiliki S/N ratio terbesar. Sehingga didapatkan kombinasi parameter optimum berupa temperatur austenisasi 877°C (level 3), media *quenching brine* (level 3), dan temperatur *tempering* 545°C (level 1).

Melalui analisis ini juga dapat dilakukan prediksi kekerasan akhir baja bila diperlakukan dengan parameter optimum. Perhitungan prediksi ini memerlukan tabel respon kekerasan yang dapat dibuat sebagaimana tabel respon S/N ratio, sebagaimana yang ditunjukkan Tabel 4.6 di bawah ini.

Tabel 4.6 Respon kekerasan untuk level dari tiap parameter

| Level | Temp. Austenisasi | Media <i>Quenching</i> | Temp. <i>Tempering</i> |
|-------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 341,75 | 335,42 | 367,28 |
| 2 | 340,25 | 342,61 | 337,81 |
| 3 | 343,25 | 347,22 | 320,17 |
| Delta | 3 | 11,81 | 47,11 |
| Rank | 3 | 2 | 1 |

Selanjutnya, prediksi kekerasan maupun *S/N ratio* optimum dapat dihitung menggunakan rumus berikut,

$$\text{Prediksi} = y + (A_3 - y) + (B_3 - y) + (C_1 - y) \quad (4.1)$$

Dimana,

y: rata-rata kekerasan atau *S/N ratio* pada parameter dengan *rank* terendah.

A₃: kekerasan atau *S/N ratio* level 3 pada parameter temperatur austenisasi.

B₃: kekerasan atau *S/N ratio* level 3 pada parameter media *quenching*.

C₁: kekerasan atau *S/N ratio* level 1 pada parameter temperatur *tempering*.

Hasil perhitungan prediksi kekerasan dan *S/N ratio* optimum ditunjukkan oleh Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Prediksi kekerasan dan *S/N ratio* optimum

| Prediksi Optimum | |
|------------------|---------|
| <i>S/N Ratio</i> | 51,4805 |
| Kekerasan (HV) | 374,25 |

4.3.2 Analisis ANOVA

Meski parameter yang memiliki pengaruh terkuat dan terlemah telah ditunjukkan secara tidak langsung oleh *rank* pada Tabel 4.5, namun persentase kontribusi dari tiap parameter tersebut belum diketahui. Untuk mengetahui persentase kontribusi tersebut, dilakukan analisis dengan *ANOVA*. Pada penelitian ini, digunakan jenis *two-way ANOVA* karena parameter dan level yang digunakan lebih dari dua. Perhitungan dalam analisis ini dilakukan berdasarkan data *S/N ratio* sampel pada Tabel 4.4 Hasil analisis ditunjukkan oleh Tabel 4.8 di bawah ini.

Tabel 4.8 *ANOVA* untuk kekerasan optimum baja AISI 4140

| Parameter | dF | SS | V | F | P(%) |
|---------------------------|----|--------|--------|---------|-------|
| Temp. Austenisasi | 2 | 0,0107 | 0,0053 | 0,4430 | 0,46 |
| Media <i>Quench</i> | 2 | 0,1363 | 0,0682 | 5,6512 | 5,84 |
| Temp. <i>Tempering</i> | 2 | 2,1647 | 1,0823 | 89,7185 | 92,67 |
| Error | 2 | 0,0241 | 0,0121 | | 1,03 |
| Total | 8 | 2,3358 | | | |

Persentase kontribusi dari tiap parameter ditunjukkan oleh kolom P (%). Temperatur *tempering* menjadi parameter dengan kontribusi terbesar dan temperatur austenisasi menjadi parameter dengan kontribusi terendah. Ini sesuai dengan yang ditunjukkan oleh *rank* pada Tabel 4.5. Temperatur austenisasi mempunyai persentase kontribusi sebesar 0,46%. Parameter ini berperan dalam meningkatkan *hardenability* baja secara temporer. Semakin tinggi temperatur, makin banyak karbon yang terlarut ke dalam austenit. Butir austenit juga akan tumbuh semakin besar. Hal ini akan menghambat pembentukan struktur non-martensitik pada saat *quenching* (Totten, 2007). Media *quenching* memiliki persentase kontribusi sebesar 5,84%.

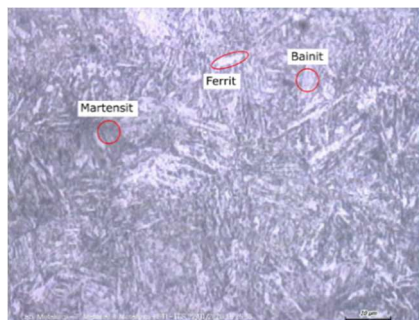
Parameter ini berpengaruh terhadap kekerasan baja setelah *quenching*. Penelitian yang dilakukan oleh Rosa (2019) menunjukkan bahwa semakin cepat laju pendinginan, maka kekerasan baja akan semakin tinggi. Temperatur tempering memiliki persentase kontribusi tertinggi sebesar 92,67%. Parameter ini memengaruhi kekerasan baja dengan mendekomposisikan martensit. Semakin tinggi temperatur yang digunakan, maka kekerasan baja akan semakin turun karena martensit berubah menjadi struktur yang lebih lunak (Thelning, 1984).

4.4 Hasil Pengujian Konfirmasi

Pengujian konfirmasi dilakukan dengan melakukan perlakuan panas sesuai kombinasi parameter optimum. Selanjutnya, dilakukan pengujian kekerasan dan metalografi. Hasil uji kekerasan dan *S/N ratio* ditunjukkan oleh Tabel 4.9, sementara hasil metalografi ditunjukkan oleh Gambar 4.4.

Tabel 4.9 Kekerasan dan *S/N ratio* sampel optimum

| Sampel | Kekerasan (HV) | | | Rata-rata (HV) | S/N Ratio |
|---------|----------------|-----|-------|----------------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| Optimum | 376,75 | 377 | 376,5 | 376,75 | 51,5211 |



Gambar 4.4 Struktur mikro sampel optimum (perbesaran 1000x, etsa nital)

Sampel optimum memiliki kekerasan rata-rata sebesar 376,75 HV. Tidak berbeda jauh dengan sampel nomor 3 dengan kekerasan sebesar 375,92 HV. Hal ini karena kedua sampel tersebut hanya berbeda dalam temperatur austenisasi saja. Temperatur austenisasi hanya memiliki pengaruh tidak sampai 0,5% terhadap hasil akhir, sehingga perbedaannya tidak akan signifikan. Bila dibandingkan dengan hasil prediksi pada Tabel 4.9, ada perbedaan nilai dimana hasil aktual lebih besar dari hasil prediksi, dengan nilai deviasi 0,668% untuk kekerasan dan 0,0788% untuk *S/N* ratio. Hasil pengujian konfirmasi juga memiliki perbedaan dengan nilai maksimum kekerasan yang dipersyaratkan oleh ASSAB 709 yaitu 372 HV. Perbedaan ini disebabkan karena ada parameter-parameter lain yang sebenarnya berpengaruh terhadap hasil namun tidak dimasukkan ke dalam eksperimen, sehingga menjadi *noise* bagi data. Seperti halnya parameter yang dimasukkan ke dalam batasan masalah karena adanya kesulitan dalam mengontrolnya. Hal ini ditunjukkan oleh *error* dalam analisis *ANOVA*.

Dari segi struktur mikro, sampel optimum memiliki struktur yang terdiri atas martensit, ferrit, dan bainit. Strukturnya juga tidak berbeda jauh dengan sampel nomor 3. Kekerasannya jauh lebih tinggi dari rata-rata sampel pada *orthogonal array* karena keberadaan martensit, meski martensit yang ada bentuknya lebih kecil karena telah berdekomposisi akibat *tempering*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melalui analisis *S/N ratio*, didapatkan kombinasi parameter optimum berupa temperatur austenisasi 877°C, media *quenching brine*, dan temperatur *tempering* 545°C. Perlakuan panas menggunakan kombinasi parameter optimum menghasilkan kekerasan baja sebesar 376,75 HV.
2. Melalui analisis *ANOVA*, didapatkan persentase kontribusi dari tiap parameter terhadap hasil akhir. Temperatur austenisasi memiliki persentase sebesar 0,46%; media *quenching* memiliki persentase sebesar 5,84%; dan temperatur *tempering* memiliki persentase sebesar 92,67%.

5.2 Saran

Adapun saran dari dan bagi penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebaiknya dilakukan pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk melihat secara lebih akurat struktur yang terbentuk dan mengukur tegangan internal dari setiap sampel.
2. Proses perlakuan panas sebaiknya menggunakan *furnace* yang mempunyai akurasi temperatur yang baik.
3. Media *quenching* air dan *brine* rentan menimbulkan *crack* pada baja setelah *quenching*. Untuk mendapatkan hasil yang optimal dengan resiko *crack* lebih rendah, dapat menggunakan oli dengan temperatur *tempering* lebih rendah.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 1991. **ASM Handbook Vol. 4: Heat Treatment**. USA: ASM International
- _____. 2004. **ASM Handbook Vol. 9: Metallography**. USA: ASM International
- _____. 2000. **ASTM A29 Standard Specification for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought**. USA: ASM International
- Andika, Rosa Amalia Dwi. 2019. **Analisis Pengaruh Variasi Media Pendingin Pada Hardening dan Temperatur Tempering Terhadap Kekerasan Baja AISI 4340 Untuk Aplikasi Poros Pompa Multistage**. Surabaya: ITS
- Anggraini, Dian, Boybul, & N., Arif. 2005. Aplikasi Spektrometer Emisi Pada Analisis Unsur-unsur Bahan Paduan Aluminium AlMgSi-1. **Jurnal Teknik Bahan Nuklir**, 1 (2), 58-107
- ASSAB. 2018. **ASSAB 709 Product Book**. ASSAB Steels
- Avner, Sydney H. 1974. **Introduction to Physical Metallurgy**. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Azizi, Muhammad Junda. 2019. **Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Tempering Terhadap Kekerasan Baja ASSAB 705 yang Dihardening Untuk Aplikasi Poros Pompa Multistage**. Surabaya: ITS
- Callister, William D., & Rethwisch, David G. 2014. **Materials Science and Engineering 9th Edition**. New York: Wiley
- Dieter, George E. 1988. **Mechanical Metallurgy**. USA: Mc-Graw Hill
- Fendri, R., Darmawi, Syahrul, & Jasman. 2018. **Analisis Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja AISI 4140 Akibat Perbedaan Temperatur Pada Perlakuan Panas Tempering**. Padang: Universitas Negeri Padang
- Future-Tech. 2011. **Sample Preparation Machines Product Book**. Future-Tech Corp.


-
- Harahap, Sorimuda, & Fakhruddin, Muhammad Iqbal. 2018. **Perancangan Pompa Sentrifugal Untuk Water Treatment Plant Kapasitas 0,25 m³/s Pada Kawasan Industri Karawang**. Jakarta: Universitas Pancasila
- Hariady, Sofwan. 2014. Analisa Kerusakan Pompa Sentrifugal 53-101C WTU Sungai Gerong PT. Pertamina RU III Plaju. **Jurnal Desiminasi Teknologi**, 2 (1), 29-32
- Kappes, Mariano, Iannuzzi, Mariano, Rebak, Raul B., & Carranza, Ricardo M. 2014. Sulfide Stress Cracking of Nickel-Containing Low-Alloy Steels. **Corros Rev**, 27
- Kobasko, Nikolai I. 2011. Correlation Between Chemical Composition of Steel, Optimal Hardened Layer, and Optimal Residual Stress Distribution. **Journal of ASTM International**, 8 (3)
- Kumar, Ajay, Ansari, A.R., Roy, B.N., & Kumar, Subodh. 2016. Heat Treatment Parameter Optimization Using Taguchi Technique. **IJSRE**, 4 (10), 5965-5974
- Patel, V.B., Parikh, S.D., Patel, P.R., & Mishra, M.S. 2018. Investigating The Heat Treatment Parameters of En-31 Using Taguchi Method. **IJISET**, 5 (5), 38-48
- Roy, Ranjit K. 2010. **A Primer on The Taguchi Method**. USA: Society of Manufacturing Engineers
- Shahavi, M.H., Hosseini, M., Jahanshahi, M., Meyer, R.L., & Darzi, G.N. 2015. Clove Oil Nanoemulsion As An Effective Antibacterial Agent: Taguchi Optimization Method. **Desalination and Water Treatment**, 1-12
- Sidi, Pranowo, & Wahyudi, Muhammad Thoriq. 2013. Aplikasi Metoda Taguchi Untuk Mengetahui Optimasi Kebulatan Pada Proses Bubut CNC. **Jurnal Rekayasa Mesin**, 4 (2), 101-108
- Suherman, Wahid. 1999. **Ilmu Logam II**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Suherman, Wahid. 2003. **Ilmu Logam I**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
-

-
- Suherman, Wahid. 2011. **Perlakuan Panas**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Sumarno, Gatot, & Suwarti. 2015. Kinerja Multistage HP/IP Feed Water Pump Pada HRSG Di Sektor Pembangkitan PLTGU Cilegon. **Jurnal Teknik Energi**, 11 (2), 47-52
- Suryo, Sumar H., Bayuseno, A.P., Paryanto, & Pangeran, A.R. 2018. Parameter Optimization of Heat Treatment on AISI 4140 Material Hardness Value for Bucket Teeth Application Using Taguchi Method. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, 13 (14), 5873-5880
- Thelning, Karl-Erik. 1984. **Steel and Its Heat Treatment Second Edition**. Delhi: Butterworth-Heinemann
- Tiandho, Yuant, Tiandho, Assyira A., & Afriani, Fitri. 2018. Analisis Kuantitatif Metalografi Berdasarkan Pengolahan Citra Menggunakan Wolfram Mathematica. **Prosiding SNPPM**. Pangkalpinang, 2 Oktober
- Totten, George E. 2007. **Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies Second Edition**. USA: Taylor & Francis Group
-


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

1. Hasil Uji Komposisi Sampel



PT. LOGAMINDO SARIMULIA
IRON AND STEEL FOUNDRY
Telp : (62-31) 8544540 - 41 Fax : (62-31) 8544542
E-mail : Lisafoundry@gmail.com
www.logamindosarimulia.com



Method: Fe-10-F IARM 200C

Comment: Low alloy Steel

Sample Name:

Element concentration

Quality:

9/27/2019 10:35:13 AM


| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni |
|-----------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| | % | % | % | % | % | % | % | % |
| 1 | 0.407 | 0.236 | 0.840 | 0.0206 | 0.0138 | 0.925 | 0.186 | 0.0180 |
| 2 | 0.419 | 0.244 | 0.820 | 0.0226 | 0.0154 | 0.915 | 0.186 | 0.0200 |
| 3 | 0.387 | 0.232 | 0.832 | 0.0196 | 0.0121 | 0.920 | 0.182 | 0.0199 |
| < x > (3) | 0.405 | 0.237 | 0.830 | 0.0209 | 0.0138 | 0.920 | 0.185 | 0.0193 |
| sd | 0.0162 | 0.0061 | 0.0098 | 0.0015 | 0.0017 | 0.0052 | 0.0026 | 0.0011 |
| rsd | 4.0 | 2.6 | 1.2 | 7.2 | 12.2 | 0.6 | 1.4 | 5.9 |

| | Al | Co | Cu | Nb | Ti | V | W | Pb |
|-----------|---------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|
| | % | % | % | % | % | % | % | % |
| 1 | 0.0264 | 0.0084 | 0.0407 | < 0.0010 | 0.0030 | 0.0046 | < 0.0100 | < 0.0030 |
| 2 | 0.0307 | 0.0081 | 0.0407 | < 0.0010 | 0.0029 | 0.0046 | < 0.0100 | < 0.0030 |
| 3 | 0.0255 | 0.0073 | 0.0405 | < 0.0010 | 0.0025 | 0.0045 | < 0.0100 | < 0.0030 |
| < x > (3) | 0.0275 | 0.0079 | 0.0406 | < 0.0010 | 0.0028 | 0.0046 | < 0.0100 | < 0.0030 |
| sd | 0.0028 | 0.00054 | 0.00011 | 0.00000 | 0.00027 | 0.00007 | 0.00000 | 0.00000 |
| rsd | 10.1 | 6.9 | 0.3 | 0.0 | 9.6 | 1.6 | 0.0 | 0.0 |

| | Sn | As | Zr | Bi | Ca | Ce | B | Zn |
|-----------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|---------------|--------------------|----------------|--------------------|
| | % | % | % | % | % | % | % | % |
| 1 | 0.0035 | 0.0065 | < 0.0015 | < 0.0040 | 0.0022 | < 0.0030 | 0.00027 | < 0.0020 |
| 2 | 0.0043 | 0.0086 | < 0.0015 | < 0.0040 | 0.0046 | < 0.0030 | 0.00027 | < 0.0020 |
| 3 | 0.0037 | 0.0071 | < 0.0015 | < 0.0040 | 0.0021 | < 0.0030 | 0.00027 | < 0.0020 |
| < x > (3) | 0.0038 | 0.0074 | < 0.0015 | < 0.0040 | 0.0030 | < 0.0030 | 0.00027 | < 0.0020 |
| sd | 0.00041 | 0.0011 | 0.00000 | 0.00000 | 0.0015 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| rsd | 10.8 | 14.8 | 0.0 | 0.0 | 50.5 | 0.0 | 0.6 | 0.0 |

| | La | Fe | Sb | Te | | | | |
|-----------|--------------------|-------------|---------------|---------------|--|--|--|--|
| | % | % | % | % | | | | |
| 1 | < 0.0010 | 97.2 | 0.0021 | 0.0021 | | | | |
| 2 | < 0.0010 | 97.2 | 0.0043 | 0.0025 | | | | |
| 3 | < 0.0010 | 97.3 | 0.0034 | 0.0027 | | | | |
| < x > (3) | < 0.0010 | 97.2 | 0.0033 | 0.0024 | | | | |
| sd | 0.00000 | 0.0272 | 0.0011 | 0.00030 | | | | |
| rsd | 0.0 | 0.0 | 34.4 | 12.6 | | | | |

Tanda tangan



PT. LOGAMINDO SARIMULIA
Jl. Muncul Gedangan - Sukirno
Telp. (031) 8544540 - 41 3830787
Fax (031) 8544542

2. Standar ASTM A29

A 29/A 29M - 05

TABLE 2 Grade Designations and Chemical Compositions of Alloy Steel Bars

Note 1—Small quantities of certain elements are present in alloy steels, which are not specified or required. These elements are considered as incidental and may be present to the following maximum atomic: copper, 0.35 %; nickel, 0.25 %; chromium, 0.20 % and molybdenum, 0.06 %.

Note 2—Where minimum and maximum sulfur content is shown it is indicative of reconditioned steel.

Note 3—The chemical ranges and limits shown in Table 2 are produced to protect analysis tolerances shown in Table 6.

Note 4—Standard alloy steels can be produced with a lead range of 0.15-0.35 %. Such steels are identified by inserting the letter "L" between the second and third numerals of the AISI number, for example, 41 L 40. A cast or heat analysis is not determinative when lead is added to the ladle stream.

| Grade Designation | Heat Chemical Ranges and Limits, % | | | | | | |
|--------------------|------------------------------------|-----------|-----------------|-------------|----------------------|-----------|-------------------------------|
| | Carbon | Manganese | Phosphorus, max | Sulfur, max | Silicon ^a | Nickel | Chromium |
| 1330 | 0.30-0.33 | 1.00-1.20 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | — |
| 1335 | 0.30-0.36 | 1.00-1.20 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | — |
| 1340 | 0.30-0.43 | 1.00-1.20 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | — |
| 1345 | 0.43-0.48 | 1.00-1.20 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | — |
| 4037 | 0.30-0.14 | 0.75-1.00 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.15-0.25 |
| 4032 | 0.20-0.25 | 0.75-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.20-0.30 |
| 4034 | 0.20-0.25 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.025-0.050 | 0.15 to 0.35 | — | 0.20-0.30 |
| 4037 | 0.25-0.30 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.20-0.30 |
| 4038 | 0.25-0.30 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.025-0.050 | 0.15 to 0.35 | — | 0.20-0.30 |
| 4032 | 0.20-0.25 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.20-0.30 |
| 4037 | 0.20-0.40 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.20-0.30 |
| 4042 | 0.40-0.45 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.20-0.30 |
| 4047 | 0.45-0.50 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.20-0.30 |
| 4118 | 0.18-0.22 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.40-0.60 | 0.08-0.15 |
| 4120 | 0.18-0.22 | 0.80-1.20 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.40-0.60 | 0.15-0.20 |
| 4121 | 0.18-0.22 | 0.75-1.00 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.45-0.60 | 0.20-0.30 |
| 4130 | 0.28-0.32 | 0.40-0.60 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.80-1.10 | 0.15-0.25 |
| 4135 | 0.23-0.28 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.80-1.10 | 0.15-0.25 |
| 4137 | 0.23-0.40 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.80-1.10 | 0.15-0.25 |
| 4140 | 0.30-0.40 | 0.75-1.00 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.80-1.10 | 0.15-0.25 |
| 4142 | 0.40-0.45 | 0.75-1.00 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.80-1.10 | 0.15-0.25 |
| 4143 | 0.43-0.48 | 0.75-1.00 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.80-1.10 | 0.15-0.25 |
| 4147 | 0.45-0.50 | 0.75-1.00 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.80-1.10 | 0.15-0.25 |
| 4150 | 0.48-0.53 | 0.75-1.00 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.80-1.10 | 0.15-0.25 |
| 4161 | 0.56-0.64 | 0.75-1.00 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.70-0.90 | 0.25-0.35 |
| 4320 | 0.17-0.22 | 0.45-0.65 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 1.65-2.00 | 0.40-0.60 |
| 4340 | 0.30-0.43 | 0.60-0.80 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 1.65-2.00 | 0.75-0.90 |
| 4340L | 0.30-0.43 | 0.65-0.85 | 0.025 | 0.025 | 0.15 to 0.35 | 1.65-2.00 | 0.75-0.90 |
| 4418 | 0.18-0.22 | 0.45-0.65 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.45-0.60 |
| 4422 | 0.20-0.25 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.35-0.45 |
| 4427 | 0.24-0.29 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.35-0.45 |
| 4815 | 0.13-0.18 | 0.45-0.65 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 1.65-2.00 | 0.20-0.30 |
| 4820 | 0.17-0.22 | 0.45-0.65 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 1.65-2.00 | 0.20-0.30 |
| 4821 | 0.18-0.22 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 1.65-2.00 | 0.20-0.30 |
| 4826 | 0.24-0.29 | 0.45-0.65 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.70-1.00 | 0.15-0.25 |
| 4715 | 0.13-0.18 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.70-1.00 | 0.45-0.60 |
| 4718 | 0.16-0.21 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.90-1.20 | 0.25-0.35 |
| 4720 | 0.17-0.22 | 0.50-0.70 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.90-1.20 | 0.15-0.25 |
| 4815 | 0.13-0.18 | 0.40-0.60 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 3.25-3.75 | 0.20-0.30 |
| 4817 | 0.15-0.20 | 0.40-0.60 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 3.25-3.75 | 0.20-0.30 |
| 4820 | 0.18-0.22 | 0.50-0.70 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 3.25-3.75 | 0.20-0.30 |
| 5015 | 0.12-0.17 | 0.30-0.50 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.30-0.50 |
| 5048 | 0.43-0.48 | 0.75-1.00 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.30-0.35 |
| 5115 | 0.13-0.18 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.70-0.90 |
| 5120 | 0.17-0.22 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.70-0.90 |
| 5130 | 0.28-0.33 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.80-1.10 |
| 5132 | 0.30-0.36 | 0.80-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.75-1.00 |
| 5135 | 0.33-0.38 | 0.80-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.80-1.05 |
| 5140 | 0.38-0.43 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.70-0.90 |
| 5145 | 0.43-0.48 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.70-0.90 |
| 5147 | 0.48-0.51 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.85-1.15 |
| 5150 | 0.48-0.53 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.70-0.90 |
| 5155 | 0.51-0.59 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.70-0.90 |
| 5160 | 0.50-0.61 | 0.75-1.00 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.70-0.90 |
| 520100 | 0.98-1.10 | 0.25-0.45 | 0.025 | 0.025 | 0.15 to 0.35 | — | 0.40-0.60 |
| 521100 | 0.28-1.10 | 0.25-0.45 | 0.025 | 0.025 | 0.15 to 0.35 | — | 0.90-1.15 |
| 522100 | 0.90-1.10 | 0.25-0.45 | 0.025 | 0.025 | 0.15 to 0.35 | — | 1.30-1.60 |
| 52700 ^b | 0.30-1.05 | 0.25-0.45 | 0.025 | 0.015 | 0.15 to 0.35 | — | 1.25-1.60 |
| 6118 | 0.18-0.21 | 0.50-0.70 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | — | 0.50-0.75 |
| 6150 | 0.48-0.53 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.80-1.10 | (0.10-0.15 V) (0.15 min V) |
| 8115 | 0.13-0.18 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.20-0.40 | 0.30-0.50 |
| 8815 | 0.13-0.18 | 0.70-0.90 | 0.025 | 0.040 | 0.15 to 0.35 | 0.40-0.70 | 0.40-0.60 |

3. Standar ASSAB 709

GENERAL

ASSAB 709 is an alloyed machinery steel with high strength in small and medium size.

ASSAB 709 is supplied as quenched and hardened requiring no further heat treatment. However, it can be water, oil or polymer quenched to higher mechanical properties.

| Typical analysis % | C 0.4 | S 0.2 | Mn 0.8 | Cr 1.0 | Ni 0.2 |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Reference standard | AISI 4140, DIN 42CrMo4, WNr 1.7235, BS EN19, AFNOR 42CD4, JS SCr14 | | | | |
| Delivery condition | Quenched and tempered to 285-352HRC | | | | |

APPLICATIONS

ASSAB 709 is intended for use in the as-delivered condition, requiring no further heat treatment. However, it can be oil, water or polymer hardened to higher hardness and higher mechanical properties if required.

ASSAB 709 is suitable for flame and induction hardening and can also be nitrided or tufnitrided to a surface hardness of 600-650 Vickers.

ASSAB 709 is not suitable for welding but can be repair welded when certain precautions are taken.

Typical applications include high strength machine parts, spindles, high strength bolts and studs, gears, axle shaft, crankshafts, connecting rods, arbors etc.

PROPERTIES

MECHANICAL DATA

QUENCHED AND TEMPERED

| Mechanical Properties | Typical values under required condition | |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------|
| Diameter, mm | ≥100 | 101-210 |
| Yield strength, R _p 0.2, N/mm ² | ≥ 750 | ≥ 650 |
| Tensile strength, R _m /N/mm ² | ≥ 950 | ≥ 850 |
| Elongation, A ₅ % | ≥ 13 | ≥ 14 |
| Reduction of area, Z, % | ≥ 43 | ≥ 45 |
| Impact strength (Charpy-V at -20°C), J/mm ² | ≥ 50 | ≥ 50 |



Components (main shafts) for palm oil extract



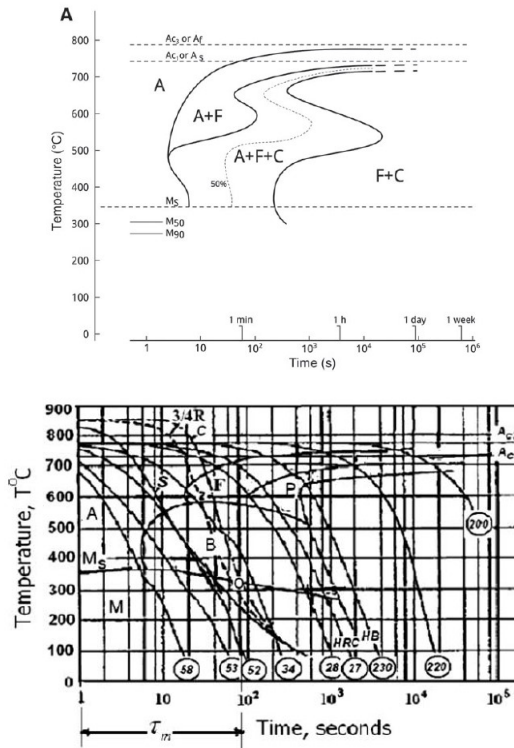
Car components

ASSAB is a trademark of Swedish High Performance Steels AB. The information contained herein is based on our present state of knowledge and is intended to provide general guides to our products and their uses. It should not therefore be construed as a warranty of specific properties of the products described or a warranty for fitness for a particular purpose. Each user of ASSAB products is responsible for making its own determination as to the suitability of ASSAB products and services.

Revision 20190306

© ASSAB 709

4. Diagram TTT & CCT AISI 4140



5. Hasil Uji Kekerasan Sampel *Orthogonal Array L9* Per Titik

| Sampel | No. <i>Trial</i> | Hasil Uji Kekerasan (HV) | | | |
|--------|---------------------|--------------------------|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1 | 331 | 329 | 327 | 322 |
| | 2 | 334 | 332 | 331 | 329 |
| | 3 | 334 | 331 | 329 | 327 |
| 2 | 1 | 327 | 314 | 317 | 312 |

| | | | | | |
|---|---|-----|-----|-----|-----|
| | 2 | 325 | 323 | 320 | 317 |
| | 3 | 325 | 321 | 317 | 318 |
| | 1 | 386 | 374 | 375 | 374 |
| 3 | 2 | 382 | 377 | 375 | 372 |
| | 3 | 386 | 377 | 372 | 361 |
| | 1 | 320 | 318 | 309 | 306 |
| 4 | 2 | 320 | 319 | 314 | 306 |
| | 3 | 324 | 320 | 315 | 315 |
| | 1 | 364 | 364 | 363 | 362 |
| 5 | 2 | 370 | 365 | 359 | 358 |
| | 3 | 372 | 370 | 366 | 365 |
| | 1 | 359 | 343 | 339 | 324 |
| 6 | 2 | 342 | 341 | 337 | 332 |
| | 3 | 349 | 342 | 340 | 337 |
| | 1 | 376 | 369 | 357 | 356 |
| 7 | 2 | 366 | 357 | 356 | 355 |
| | 3 | 365 | 362 | 359 | 355 |
| | 1 | 343 | 346 | 344 | 331 |
| 8 | 2 | 350 | 346 | 345 | 344 |
| | 3 | 348 | 345 | 343 | 335 |
| | 1 | 330 | 325 | 326 | 325 |
| 9 | 2 | 332 | 326 | 325 | 324 |
| | 3 | 328 | 324 | 319 | 320 |

6. Perhitungan *S/N Ratio* Sampel *Orthogonal Array L9*

| Sampel | Kekerasan (HV) | | | Rata-rata (HV) | S/N Ratio |
|--------|----------------|--------|--------|-------------------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | 327,25 | 331,5 | 330,25 | 329,67 | 50,3611 |
| 2 | 317,5 | 321,25 | 320,25 | 319,67 | 50,0936 |

| | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|---------|
| 3 | 377,25 | 376,5 | 374 | 375,92 | 51,5017 |
| 4 | 313,25 | 314,75 | 318,5 | 315,5 | 49,9794 |
| 5 | 363,25 | 363 | 368,25 | 364,83 | 51,2413 |
| 6 | 341,25 | 338 | 342 | 340,42 | 50,6399 |
| 7 | 364,5 | 358,5 | 360,25 | 361,08 | 51,1515 |
| 8 | 341 | 346,25 | 342,75 | 343,33 | 50,7138 |
| 9 | 326,5 | 326,75 | 322,75 | 325,33 | 50,2462 |

$$S/N = -10 \log_{10} (MSD)$$

$$MSD = \frac{1/Y_1^2 + 1/Y_2^2 + \dots + 1/Y_n^2}{N}$$

a. Sampel 1

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1/327,25^2 + 1/331,5^2 + 1/330,25^2}{3} \right)$$

$$= 50,3611$$

b. Sampel 2

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1/317,5^2 + 1/321,25^2 + 1/320,25^2}{3} \right)$$

$$= 50,0936$$

c. Sampel 3

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1/377,25^2 + 1/376,5^2 + 1/374^2}{3} \right)$$

$$= 51,5017$$

d. Sampel 4

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1/313,25^2 + 1/314,75^2 + 1/318,5^2}{3} \right) \\ = 49,9794$$

e. Sampel 5

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1/363,25^2 + 1/363^2 + 1/368,25^2}{3} \right) \\ = 51,2413$$

f. Sampel 6

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1/341,25^2 + 1/338^2 + 1/342^2}{3} \right) \\ = 50,6399$$

g. Sampel 7

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1/364,5^2 + 1/358,5^2 + 1/360,25^2}{3} \right) \\ = 51,1515$$

h. Sampel 8

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1/341^2 + 1/346,25^2 + 1/342,75^2}{3} \right) \\ = 50,7138$$

i. Sampel 9

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1/326,5^2 + 1/326,75^2 + 1/322,75^2}{3} \right) \\ = 50,2462$$

7. Perhitungan Prediksi Kekerasan dan *S/N Ratio* Optimum

| Level | Temp. Austenisasi | Media <i>Quenching</i> | Temp. <i>Tempering</i> |
|-------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 50,6521 | 50,4973 | 51,2982 |
| 2 | 50,6202 | 50,6829 | 50,5716 |
| 3 | 50,7038 | 50,7959 | 50,1064 |
| Delta | 0,0836 | 0,2986 | 1,1918 |
| <i>Rank</i> | 3 | 2 | 1 |

| Level | Temp. Austenisasi | Media <i>Quenching</i> | Temp. <i>Tempering</i> |
|-------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 341,75 | 335,42 | 367,28 |
| 2 | 340,25 | 342,61 | 337,81 |
| 3 | 343,25 | 347,22 | 320,17 |
| Delta | 3 | 11,81 | 47,11 |
| <i>Rank</i> | 3 | 2 | 1 |

$$\text{Prediksi} = y + (A_3 - y) + (B_3 - y) + (C_1 - y)$$

$$y \text{ (HV)} = \frac{341,75 + 340,25 + 343,25}{3} = 341,75$$

$$y \text{ (SN)} = \frac{50,6521 + 50,6202 + 50,7038}{3} = 50,6587$$

$$\begin{aligned} \text{Prediksi (HV)} &= 341,75 + (343,25 - 341,75) \\ &\quad + (347,22 - 341,75) \\ &\quad + (367,28 - 341,25) = 374,25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Prediksi (SN)} &= 50,6587 + (50,7038 - 50,6587) \\ &\quad + (50,7959 - 50,6587) \\ &\quad + (51,2982 - 50,6587) = 51,4805 \end{aligned}$$

8. Perhitungan ANOVA

| Parameter | dF | SS | V | F | P(%) |
|------------------------|----|--------|--------|---------|-------|
| Temp. Austenisasi | 2 | 0,0107 | 0,0053 | 0,4430 | 0,46 |
| Media <i>Quench</i> | 2 | 0,1363 | 0,0682 | 5,6512 | 5,84 |
| Temp. <i>Tempering</i> | 2 | 2,1647 | 1,0823 | 89,7185 | 92,67 |
| Error | 2 | 0,0241 | 0,0121 | | 1,03 |
| Total | 8 | 2,3358 | | | |

A: Temp. Austenisasi, B: Media *Quench*, C: Temp. *Tempering*, E: Error.

a. Perhitungan Derajat Kebebasan (dF)

$$\begin{aligned} f_T &= N - 1 = 9 - 1 = 8 \\ f_A &= f_B = f_C = 3 - 1 = 2 \\ f_E &= f_T - (f_A + f_B + f_C) = 8 - (2 + 2 + 2) = 2 \end{aligned}$$

b. Perhitungan Total Sum of Square (S_T)

$$\begin{aligned} \text{Total (S/N)} &= 50,3611 + 50,0936 + 51,5017 \\ &\quad + 49,9794 + 51,2413 + 50,6399 \\ &\quad + 51,1515 + 50,7138 + 50,2462 \\ &= 455,9284 \end{aligned}$$

$$\text{Av. Total (S/N)} = \frac{455,9284^2}{9} = 23096,7466$$

$$\begin{aligned} Total (S/N)^2 &= [(50,3611)^2 + (50,0936)^2 \\ &\quad + (51,5017)^2 + (49,9794)^2 \\ &\quad + (51,2413)^2 + (50,6399)^2 \\ &\quad + (51,1515)^2 + (50,7138)^2 \\ &\quad + (50,2462)^2] = 23099,08 \end{aligned}$$

$$S_T = Total (S/N)^2 - Av.Total (S/N) = 2,3358$$

- c. Perhitungan *Factor's Sum of Square* (SS)

$$S_A = \left[\left(\frac{(\sum A_1)^2}{k_{A_1}} \right) + \dots + \left(\frac{(\sum A_9)^2}{k_{A_9}} \right) \right] - Av.Total (S/N)$$

$$S_A = 23096,7573 - 23096,7466 = 0,0107$$

$$S_B = \left[\left(\frac{(\sum B_1)^2}{k_{B_1}} \right) + \dots + \left(\frac{(\sum B_9)^2}{k_{B_9}} \right) \right] - Av.Total (S/N)$$

$$S_B = 23096,8830 - 23096,7466 = 0,1363$$

$$S_C = \left[\left(\frac{(\sum C_1)^2}{k_{C_1}} \right) + \dots + \left(\frac{(\sum C_9)^2}{k_{C_9}} \right) \right] - Av.Total (S/N)$$

$$S_C = 23098,9113 - 23096,7466 = 2,1647$$

$$S_E = S_T - (S_A + S_B + S_C)$$

$$S_E = 2,3358 - (0,0107 + 0,1363 + 2,1467) = 0,0241$$

- d. Perhitungan *Variance* (V)

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} = \frac{0,0107}{2} = 0,0053$$

$$V_B = \frac{S_B}{f_B} = \frac{0,1363}{2} = 0,0682$$

$$V_C = \frac{S_C}{f_C} = \frac{2,1647}{2} = 1,0823$$

$$V_E = \frac{S_E}{f_E} = \frac{0,0241}{2} = 0,0121$$

e. Perhitungan *F-Ratio* (F)

$$F_A = \frac{V_A}{V_E} = \frac{0,0053}{0,0121} = 0,4430$$

$$F_B = \frac{V_B}{V_E} = \frac{0,0682}{0,0121} = 5,6512$$

$$F_C = \frac{V_C}{V_E} = \frac{1,0823}{0,0121} = 89,7185$$

f. Perhitungan Persentase Kontribusi (P%)

$$P_A = \left(\frac{S_A}{S_T} \right) \times 100\% = \left(\frac{0,0107}{2,3358} \right) \times 100\% = 0,46\%$$

$$P_B = \left(\frac{S_B}{S_T} \right) \times 100\% = \left(\frac{0,1363}{2,3358} \right) \times 100\% = 5,84\%$$

$$P_C = \left(\frac{S_C}{S_T} \right) \times 100\% = \left(\frac{2,1647}{2,3358} \right) \times 100\% = 92,67\%$$

$$P_E = \left(\frac{S_E}{S_T} \right) \times 100\% = \left(\frac{0,0121}{2,3358} \right) \times 100\% = 1,03\%$$

9. Perhitungan Deviasi

$$Dev. (HV) = \frac{|374,25 - 376,75|}{374,25} \times 100\% = 0,668\%$$

$$Dev. (SN) = \frac{|51,4805 - 51,5211|}{51,4805} \times 100\% = 0,0788\%$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin berterima kasih kepada:

1. Kedua orang tua serta keluarga penulis yang telah menjadi sumber motivasi dalam pengerjaan Tugas Akhir, serta selalu mendukung dan mendoakan demi kelancaran perkuliahan di ITS.
2. Bapak Sutari dan Bapak Abdul Chanan selaku laboran di Lab Metalurgi & Manufaktur yang banyak membantu selama proses eksperimen Tugas Akhir di lab.
3. Erasmus sebagai *partner* tugas akhir penulis yang banyak membantu selama mengerjakan Tugas Akhir.
4. Mas Junda dan Mbak Oca MT17 yang telah banyak berbagi pengetahuan tentang topik perlakuan panas.
5. Rekan-rekan grader metalurgi MT17, MT18, dan MT19 sebagai tempat penulis belajar lebih dalam tentang metalurgi dan tukar pikiran tentang topik-topik yang terkait.
6. Teman-teman grader perlakuan panas 19/20 dan kelas C perlakuan panas 19/20 yang banyak memberikan bantuan kepada penulis dalam eksperimen mencari variabel perlakuan panas yang sesuai.
7. Teman teman Enaena Squad (Vito, Henokh, Erasmus, Daniel, Firman, Edwin, Afni, Nabil, Wira, Rio, Vian, Iqbal) yang banyak memberikan hiburan dan guyonan serta dukungan selama masa kuliah ini.
8. Teman teman Metal Mentul (Jambrong, Nail, Eka, Febri, Abah, Fitra, Edwin, Erasmus, Handis, Nabil, Wira, Rio) yang banyak bekerjasama di lab dan memberi bantuan pengerjaan Tugas Akhir.
9. Angkatan MT18 dan juga mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi secara umum, yang telah menemani dan berbagi banyak pengalaman berharga semasa kuliah.

-
10. BSO KWU HMMT, INDOCOR, ITS Billiard, dan INI LHO ITS sebagai wadah pengembangan diri penulis semasa kuliah.
 11. Annisa Shafira yang banyak memberikan dukungan maupun hiburan kepada penulis disaat mengerjakan laporan Tugas Akhir.
 12. Seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terima kasih atas bantuan yang diberikan.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Aria Narendra Adhi. Lahir di kota Surabaya pada tanggal 15 April 1998 dari pasangan Arianto Prabowo dan Herdewi Sariyani. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Al Azhar Syifa Budi Surabaya, SMPN 6 Surabaya, dan SMAN 2 Surabaya. Kemudian penulis melanjutkan studi perguruan tinggi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS. Selama

kuliah, penulis aktif di beberapa organisasi dan kepanitiaan. Penulis pernah menjabat sebagai staf Departemen Event ITS Billiard 17/18 dan juga Wakil Kepala Departemen Event ITS Billiard 18/19. Penulis juga pernah menjabat sebagai staf BSO KWU HMMT FTI-ITS 17/18. Di kepanitiaan, penulis pernah menjabat sebagai staf Sie Kamzin Ini Lho ITS 2017 dan Koor Sie Kamzin Ini Lho ITS 2018. Selain itu, penulis pernah menjadi pemandu di acara Gerigi ITS 2018. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT. Steel Pipe Industry of Indonesia (SPINDO) Unit II pada bulan Juni-Agustus 2019, dengan mendalami topik terkait Analisis Pengaruh *Annealing* Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Pipa Baja SUS304 Produksi PT. SPINDO Unit II. Penulis mengambil tugas akhir dalam bidang Metalurgi Manufaktur, khususnya perlakuan panas pada baja AISI 4140. Penulis dapat dihubungi melalui *email* dan nomor telepon: ariaadhi25@gmail.com dan 087846118254.